

Untersuchungen an transparent geklebten Glas-Kunststoff-Hybridelementen für tragende Bauteile - GKH

F. Werner, B. Weller, E. Beyer, R.-U. Bauer

Abschlussbericht zum
DFG-Forschungsvorhaben

BA 3154/2-1
BE 1875/18-1
WE 1475/6-1
WE 3636/3-1

Juni 2010

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI)
Professur Stahlbau
Marienstraße 5
D-99423 Weimar

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion (IBK)
George-Bähr-Straße 1
D-01069 Dresden

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Oberflächentechnik und Ferti-
gungsmesstechnik (IOF)
Lehrstuhl Laser- und Oberflächentechnik
George-Bähr-Straße 3c
D-01062 Dresden

Thüringisches Institut für
Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK)
An-Institut der TU Ilmenau
Breitscheidstraße 97
D-07407 Rudolstadt

1. Allgemeine Angaben

1.1 DFG-Geschäftszeichen

BA 3154/2-1

BE 1875/18-1

WE 1475/6-1

WE 3636/3-1

1.2 Antragsteller

Werner, Frank, Prof. Dr.-Ing. habil.

13.04.1949, deutsch

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI)
Professur Stahlbau
Marienstraße 5
D-99423 Weimar
T 03643 58 4444
F 03643 58 4441
frank.werner@uni-weimar.de

Weller, Bernhard, Prof. Dr.-Ing.

30.03.1952, deutsch

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion (IBK)
George-Bähr-Straße 1
D-01069 Dresden
T 0351 463 34845
F 0351 463 35039
Bernhard.Weller@tu-dresden.de

Beyer, Eckhard, Prof. Dr.-Ing. habil.

13.12.1951, deutsch

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Oberflächentechnik und Ferti-
gungsmesstechnik (IOF)
Lehrstuhl Laser- und Oberflächentechnik
George-Bähr-Straße 3c
D-01062 Dresden
T 0351 463 35210
F 0351 463 37755
beyer@iof.mw.tu-dresden.de

Bauer, Ralf-Uwe, Dr.-Ing.

19.07.1956, deutsch

Thüringisches Institut für
Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK)
An-Institut der TU Ilmenau
Breitscheidstraße 97
D-07407 Rudolstadt
T 03672 379100
F 03672 379379
bauer@titk.de

1.3 Institut/Lehrstuhl

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI)
Professur Stahlbau

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion (IBK)

Technische Universität Dresden
 Fakultät Maschinenwesen
 Institut für Oberflächentechnik und Fertigungs-
 messtechnik (IOF)
 Lehrstuhl Laser- und Oberflächentechnik

Thüringisches Institut für
 Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK)
 An-Institut der TU Ilmenau

1.4 Aus DFG-Mitteln bezahlte wissenschaftliche Mitarbeiter mit Angabe des Beschäftigungszeitraums

Bauhaus-Universität Weimar – IKI	TU Dresden – IBK
Dipl.-Ing. Katrin Zimmerer 01.10.2007 bis 29.02.2008 50% Dipl.-Ing. Björn Wittor 01.03.2009 bis 30.09.2009 50% 20.10.2009 bis 31.03.2010 50% Dr.-Ing. Jörg Hildebrand 01.03.2008 bis 31.12.2008 50% 01.06.2009 bis 31.10.2009 50% 01.02.2010 bis 31.03.2010 50% Herr Holger Dabbert 01.01.2008 bis 31.12.2008 50%	Dr.-Ing. Silke Tasche 01.10.2007 bis 30.09.2009 50% 01.11.2009 bis 31.12.2009 50% Dipl.-Ing. Martin Tasche 01.11.2008 bis 19.08.2009 50% 28.08.2009 bis 14.10.2009 50%
TU Dresden – IOF	TITK
Dipl.-Chem. Michael Müller 01.10.2007 bis 31.05.2009 100%	Dipl.-Ing. Marina Weiß-Quasdorf 01.10.2007 bis 31.10.2007 100% 01.12.2007 bis 31.12.2007 100% Dr.-Ing. Thomas Reußmann 01.01.2008 bis 31.03.2008 100% 01.04.2008 bis 31.11.2008 75% 01.12.2008 bis 30.04.2009 50% 01.05.2009 bis 31.10.2009 30% Frau Anett Kammel (Laborantin) 01.10.2007 bis 31.04.2010 50%

1.5 Thema des Projekts

Untersuchungen an transparent geklebten Glas-Kunststoff-Hybridelementen für tragende Bauteile - GKH

1.6 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

01.10.2007 bis 30.04.2010

Förderungszeitraum 2 Jahre, kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate.

1.7 Fachgebiet, Arbeitsrichtung

Bauwesen und Architektur, Konstruktiver Ingenieurbau

Polymere, Polymerverarbeitung, Verklebung Polymer-Glas

1.8 Verwertungsfelder

Konstruktiver Glasbau – Erhöhung der Resttragfähigkeit und Bauwerkssicherheit

Polymere, Polymerverarbeitung, Composites, Fügeprozesse Polymer-Glas

1.9 Am Projekt beteiligte Kooperationspartner

Entfällt.

2. Zusammenfassung

2.1 Allgemeinverständliche Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und der erzielten Fortschritte gegenüber dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Antragstellung

Im Rahmen einer Recherche konnte ein steigender Bedarf an strukturellen Glaselementen in verschiedensten Bereichen der Architektur festgestellt werden. Dabei spielen hybride Systeme eine wesentliche Rolle.

Für das Fügen von unterschiedlichen Werkstoffen kommt überwiegend das Kleben zum Einsatz. Die Oberflächenvorbehandlungen zeigten unterschiedliche Auswirkung auf die Anfangsfestigkeiten. Die Reinigung mit Ultraschall verbesserte in allen Fällen die Festigkeit des Klebverbundes. Die Oberflächenaktivierung mit dem Openair®-Plasma-Verfahren erwies sich bei den Polymethylmethacrylaten als festigkeitssteigernde Vorbehandlung der Substrate. Auch mit der SiO_x-Beschichtung durch die Flammenpyrolyse ließen sich Festigkeitssteigerungen erzielen. Beim Glas-Kunststoff-Verbund konnten in Abhängigkeit von den Klebstoffen Steigerungen von 30-60% erreicht werden. In Kombination mit geeigneten Arcylathaftvermittlern mit Silanankergruppen bot das Flammenpyrolyse-Verfahren noch Potenzial für weitere Festigkeitssteigerungen. Die aus den Versuchen gewonnenen Erfahrungen zeigten, dass ein dauerhafter adhäsiver Verbund zwischen Glas und Kunststoff mittels der Klebtechnik unter Verwendung von hochtransparenten Klebstoffen realisierbar ist.

Die Auswahl des Kunststoffes erfolgte auf Grundlage des Anforderungsprofils für Klebprozess und Tragfunktionen. In die engere Wahl kommen nur Polycarbonat (PC), Polymethylmethacrylat (PMMA) oder transparente Polyamide (PA). Sehr gute mechanische und thermische Eigenschaften weisen auch Hochtemperaturkunststoffe wie Polyetherimid (PEI) auf. Aufgrund der Eigenfarbe des Materials kann man jedoch nicht von Transparenz, sondern eher von Transluzenz sprechen. Umfangreiche Materialuntersuchungen (statische und dynamische Prüfungen, thermische Beständigkeit, Zeitstandsversuche etc.) zeigten deutlich, dass PC für Anwendungen im konstruktiven Bereich, bspw. als Träger, im Vergleich zu den anderen Materialien am besten geeignet ist. Hierfür sprechen die guten mechanischen Eigenschaften auch bei unterschiedlichen Temperaturen, die vorhandene Zähigkeit, die Wärmeformbeständigkeit sowie die geringe Kriechneigung des Materials. Zudem bietet PC den Vorteil, dass unterschiedlichste Aufmachungsformen (Granulate, Platte, Rohre und andere Profile) am Markt verfügbar sind. Die Platten werden bspw. mittels Wasserstrahl auf die erforderlichen Maße zugeschnitten. Verbindungselemente wie Bolzen oder Schrauben können entweder im Spritzgussverfahren oder durch mechanische Bearbeitung von Vollprofilen hergestellt werden.

Die für die Tragfähigkeit der Hybridträger wesentlichen Untersuchungen der Kantenfestigkeit bestätigten die geringeren Festigkeiten als in der Plattenfläche. Die Kantenfestigkeit streut nicht nur in Abhängigkeit von der Kantenqualität, sondern auch in Abhängigkeit vom Hersteller. Grund sind alle Arten von Abläufen im Produktionsprozess (Floatglasherstellung, Zugschnitt, Kantenbearbeitung). Ein unterer Grenzwert für die Kantenfestigkeit ist nach den durchgeführten Untersuchungen ca. 30% geringer als in der Fläche. Bei der Herstellung der großflächigen Klebung konnte bei der Aushärtung festgestellt werden, dass mit deutlich ge-

ringeren Strahlungsintensitäten und dafür längeren Aushärtezeiten gearbeitet werden muss, als es eigentlich für die Klebstoffe empfohlen wird, da es sonst zu starken Schrumpferscheinungen in der Klebschicht kommt. Klebeigenspannungen und Unregelmäßigkeiten in der Klebfuge zwischen Glas und Kunststoff konnten mit Hilfe der spannungsoptischen Analyse qualitativ für eine Fläche von 100 x 85 mm bestimmt werden. Es zeigte sich, dass hohe Beanspruchungen an der langen Kante der 500 x 50 mm großen Proben aufgrund der Aushärtung auftraten. Weiterhin konnte mit Hilfe der Spannungsoptik Bereiche, die sich während der Beanspruchung ablösten, lokalisiert werden.

Die Problematik der unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten von Kunststoff und Glas zeigte sich innerhalb klimatischer Untersuchungen. Dabei bestanden große Unterschiede je nach verwendetem Klebstoff. Die Ergebnisse lassen doch den Schluss zu, dass eine Einschränkung des Temperaturbereichs für die Anwendung der Hybridträger sinnvoll erscheint.

Die numerische Analyse gestattete auf Grundlage experimentell ermittelter Materialkennwerte für Glas und Kunststoff den Spannungs- und Dehnungszustand im Hybridelement infolge Kurz- und Langzeitbelastung zu beschreiben. Die Umlagerungen der Spannungen, aufgrund des viskosen Verhaltens von Kunststoff, konnten qualitativ und quantitativ bestimmt werden. Es konnte anhand einer numerischen Studie eines Doppel-T-Träger bei Kurzzeitbelastung festgestellt werden, dass die maximale Zugspannung bzw. Durchbiegung am Gurt annähernd kubisch von Glasdicke, Steghöhe und Gurtbreite abhängt. Dagegen ist der Einfluss der Kunststoffdicke nahezu linear. Ebenfalls gilt, dass die Werte der maximalen Zugspannung und Durchbiegung am Gurt mit zunehmender Glasdicke, Steghöhe und Kunststoffdicke sinken, aber mit zunehmender Gurtbreite steigen.

Die numerischen Untersuchungen zur Langzeitbelastung für 20 Jahre zeigten, dass eine deutliche Umlagerung der Spannung vom Gurtbereich in den Stegbereich mit einer Zunahme der Durchbiegung erfolgt. Je größer die Beanspruchung und Kunststoffdicke und je kleiner Glasdicke sind, umso größer sind Spannungsumlagerung und Durchbiegung. Die Steggläser wiesen nach 20 Jahren gegenüber den Gurtgläsern eine wesentlich höhere Druck- und Zugbeanspruchung auf.

In Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen unter Kurzzeitbelastung an VSG-Trägern und Hybridträgern mit Rechteckquerschnitten konnte ein vergleichbares Tragverhalten bei der Trägerarten im Fall intakter Gläser festgestellt werden. Eine Resttragfähigkeit bei komplett zerstörten VSG-Trägern war hingegen nicht vorhanden. Hybridträger mit Floatglas verfügten über eine sehr gute Resttragfähigkeit. Bei Verwendung von vorgespanntem Glas war allerdings nur eine sehr geringe Resttragfähigkeit nach vollständigem Glasbruch vorhanden. Vergleichende Versuche mit Polycarbonatscheiben zeigten ebenfalls, dass die Resttragfähigkeit nur wegen des Bruchbildes von Floatglas und der Mitwirkung des Glases zwischen den Rissen im druckbeanspruchten Bereich möglich war. Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen unter Langzeitbelastung an Hybridträgern mit Rechteckquerschnitten zeigten, dass bei intakten Glasscheiben unter Dauerlast keine Kriechverformungen infolge des Polycarbonats auftreten. Bei Zerstörung der Glasscheiben war eine Resttragfähigkeit von mehr als 48 h gegeben. In den experimentellen Untersuchungen der Doppel-T-Träger konnte

nachgewiesen werden, dass Polycarbonat geeignet ist, schlagartige Beanspruchungen, die bei Bruch des Glases auftreten, aufzunehmen. Es zeigte sich, dass der Kunststoff wesentlich zur Resttragfähigkeit beiträgt.

Für einen Hybridträger mit Rechteckquerschnitt ist es gelungen, die Rissentstehung und Rissausbreitung numerisch zu simulieren. Somit können die charakteristischen Mechanismen für Zug- und Schubversagen lokalisiert werden. Die infolge Zug- und Schubversagens durch Rissbildung hervorgerufene Materialschädigung konnte durch die in den einzelnen Versagensmethoden dissipierte Bruchenergie gesteuert werden. Für eine möglichst netzunabhängige Umsetzung dieses Bruchenergiekonzepts wurde entsprechend der Rissbandtheorie eine äquivalente Länge eingeführt. Verifizierende Berechnungen an Versuchskörpern zeigen eine gute quantitative und qualitative Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen hinsichtlich des Verformungsverhaltens, der Versagenslasten und der Versagensmechanismen.

2.2 Ausblick auf künftige Arbeiten und Beschreibung möglicher Anwendungen

Kunststoff

Im Projekt wurden wichtige transparente Polymere umfassend charakterisiert. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich transparente Composites konzipieren. Zu untersuchen wäre hier, wie der Volumengehalt der Verstärkungsfasern die Transparenz beeinflusst, aber auch, wie mechanischen bzw. thermischen Belastungen eines Composites die Transparenz verändern. Ggf. ergeben sich hier ganz neue Methoden zur Charakterisierung derartiger Materialien. Über die Kombination aus Glasfasern und Polycarbonat bzw. Polyacrylat kann man einen Verbundwerkstoff entwickeln, der in ganz anderer Weise als hier im abgeschlossenen Projekt, die Vorzüge von Glas und Kunststoff vereint. Dieses System wird Gegenstand zukünftiger Betrachtungen sein. Die umfangreichen Erfahrungen aus dem Umgang mit Glas-Kunststoff-Verbunden können auch für, eher prozess- oder produktbezogene Fragestellungen genutzt werden, z.B. für

- Untersuchungen zu Fügeprozessen für unterschiedlichste Glasbauteile, die Kunststoffelemente enthalten,
- gezielte Verbesserung der thermischen Beständigkeit von Kunststoffbauteilen über eine integrierte Glasschicht,
- gezielte Verbesserung der Kratzbeständigkeit von Kunststoffbauteilen über eine aufgetragene Glasschicht,
- Verbindungen aus Glas und photochrom funktionalisierten, transparenten Kunststoffen.

Klebstoff

Die gegenwärtigen transparenten Klebstoffe auf Acrylatbasis sind geeignet, um Glas und Kunststoff zu verbinden. Verbesserung und Optimierung der Klebstoffe sind im Bereich der Kompensation unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten, bei der Reduzierung der Wasseraufnahme und der Alterung zu sehen. Weiterhin ergeben sich Fragen hinsichtlich der Klebeigenspannungen. Dazu zählen nicht nur die Entstehung in Abhängigkeit der Prozessparameter sondern auch die Auswirkung auf das Tragverhalten der Verbindung.

Hybridelement

In künftigen Arbeiten sollte eine noch genauere Festlegung der Kantenfestigkeit in Form eines unteren Grenzwerts erfolgen, bei dem alle Unsicherheiten abgedeckt werden. Auch die Fragen des Produktionsprozesses für derartige Hybridträger sind zu klären. Ihre Anwendung können die Hybridträger in der Glasarchitektur als Substitution üblicher VSG-Träger finden, da sie eine erhöhte Sicherheit bei gleicher Tragfähigkeit und Transparenz gewährleisten. Weiterhin lassen sich die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bei den numerischen und experimentellen Untersuchungen von Glas-Kunststoff-Elemente auf andere hybride Verbindungen übertragen.

Numerische Simulation

Die numerische Analyse der Hybridelemente gestattet den komplexen Spannungszustand für unterschiedliche Beanspruchungen und Zeitpunkte zu bestimmen und ermöglicht eine beanspruchungsoptimierte Gestaltung von hybriden Tragquerschnitten und -elementen. Die numerische Erfassung von Risszuständen erlaubt die Resttragfähigkeit von Glas-Kunststoff-Elementen realitätsnäher als bisher zu erfassen.

Ein weiteres Potenzial ergibt sich in der numerischen Analyse der Herstellung von Klebfugen insbesondere die Modellierung des Aushärtprozesses und deren die resultierenden Schrumpfungen bzw. Klebeigenspannungen. Weiterhin müssen numerische Modell entwickelt werden, die geeignet sind, Schädigungen bei zeitabhängiger Beanspruchungen zu simulieren.

3. Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangslage

Ausgangslage des Projekts war der immer weiter steigende Bedarf von Architekten und Bauherren nach transparenten, lastabtragenden Bauteilen. Der Baustoff Glas kann als hochtransparenter Werkstoff mit hoher Druckfestigkeit viele der an ihn gestellten Anforderungen erfüllen. Problematisch sind jedoch das Spröbruchverhalten und die fehlende plastische Verformbarkeit des Glases. Überlastung kann bei Glasbauteilen nicht angezeigt werden und das Versagen tritt immer plötzlich und vollständig ein. Verbund-Sicherheitsglas (VSG) kann in vielen Bereichen dieses Problem abmildern und für die geforderte Sicherheit im Bauwesen sorgen. Gerade aber strukturelle, stabförmige Glaselemente, die in ihrer Scheibenebene belastet werden, wie zum Beispiel Biegeträger, besitzen bei Glasbruch keinerlei Resttragfähigkeit mehr. Diesem Sicherheitsproblem begegnet man bei den bisher verwendeten VSG-Trägern durch eine Überdimensionierung hinsichtlich Glasdicke und Scheibenanzahl.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

3.2.1 Bauhaus-Universität Weimar - Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

In einem ersten Bearbeitungsschritt erfolgte eine Analyse von möglichen Beanspruchungszuständen in tragenden Glaselementen. In Anlehnung der vermehrten Anwendung wurden biegebeanspruchte Balkenkonstruktionen hinsichtlich der Optimierung des Querschnitts und der Resttragfähigkeit untersucht. In den Voruntersuchungen zeigte sich, dass stahlbautypisi-

sche Doppel-T-Querschnitte sehr gute Trageigenschaften bei Kurzzeitbelastungen aufwiesen. Vertiefend wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt.

Im Rahmen der eigenen Arbeiten wurden insgesamt 22 Träger mit einer Länge $l = 1000$ mm, Höhe $h = 100$ mm und Gurtbreite $b = 60$ mm aus 6 mm Glasscheiben und 4 mm Kunststoffscheiben für Kurz- und Langzeituntersuchungen hergestellt. Der Vierpunkt-Biegeversuch erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1288-3. Langzeituntersuchungen wurden mit Lasten von 1 kN, 2 kN, 3 kN und 4 kN durchgeführt. Variiert wurde bei den Trägern die Ausbildung des Stegs. Bei der ersten Serie wurde die Kraftübertragung zwischen Steg und Gurt ausschließlich durch den Kunststoff realisiert. Das Glas im Stegbereich wies einen ca. 10 mm großen Abstand zum jeweiligen Gurt auf. Bei der zweiten Serie wurde das Glas im Stegbereich bis an den Gurt geführt. Weiterhin wurden 10 Hybridelemente als Rechteckquerschnitt, Länge $l = 250$ mm und Höhe $h = 50$ mm, für die experimentelle Untersuchung der Rissentstehung und -wachstum hergestellt und im Vierpunkt-Biegeversuch bis zum ersten Anriss beansprucht. Die Geometrie der Probekörper richtete sich weitgehend nach dem Messfeld des zur Verfügung stehenden spannungsoptischen Messgerätes. Dadurch konnten für einzelne Laststufen der spannungsoptische Gangunterschied und Schädigungen in der Klebfuge zerstörungsfrei ermittelt werden.

Zur Charakterisierung der Klimabeanspruchbarkeit wurden sechs der in den Abmessungen 500 x 50 mm hergestellten Glas-Polycarbonat-Glas-Verbunde dem Zyklus D3 – Wärme, Kälte und Feuchte-Zyklus – nach DIN EN ISO 9142 unterworfen. Es wurden unterschiedliche Kunststoffe - 1 x Polycarbonat und 2 x Polymethylmethacrylat mit je 4 mm Dicke - mit einer Klebstoffdicke von $s = 0,2$ mm und Pyrosil-Oberflächenvorbehandlung untersucht. Eine spannungsoptische Untersuchung konnte bei ausgewählten Proben nach dem Klebprozess und nach dem Klimatest durchgeführt werden, um die Veränderung infolge Temperaturbeanspruchung zu erfassen. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden neun Proben mit den Abmessungen 250 x 50 mm für Untersuchungen des Kantenschutzes für die Projektpartner TITK und IOF bereitgestellt. Variiert wurde der Kunststoff - 1 x Polycarbonat und 2 x Polymethylmethacrylat. Zur Untersuchung der technologischen Vorgehensweise bei großflächiger Klebung von Glas und Kunststoff für die Experimentalkonstruktion erfolgte die Herstellung eines 1650 mm langen und 150 mm hohen Trägers. Eine nahezu blasenfreie Verbindung insbesondere der Stegfläche konnte realisiert werden.

Ausgehend von der Literaturrecherche nach möglichen Verbindungsarten zwischen einzelnen Glas-Kunststoffträgern wurden zwei Varianten näher untersucht. Die experimentelle Analyse zum Tragverhalten der Rahmenverbindungen erfolgte an drei geklebten Proben und sechs Proben, die aus transparenten wasserstrahlgeschnittenen Formteilen und Bolzenverbindungen bestanden. Zum Einsatz kamen Glas und Kunststoff für das Formteil bzw. den Passbolzen. Eine feinmechanische Bearbeitung der Kunststoffbolzen war notwendig, um die gewünschte Passgenauigkeit bei den gebohrten Löchern im Träger und Formteil zu realisieren. Ein Kunststoffüberzug bei den Glasrohren, die als Bolzen dienten, ermöglichte eine individuelle Anpassung an die Löcher und eine Trennung des Kontaktes Glas-Glas.

Generell erfolgte das Auftragen des Klebstoffes, unabhängig von der Viskosität, mit Überschuss in Form großzügiger Raupen auf dem UV-stabilisierten Kunststoff. Die Verteilung des

Klebstoffes und weitestgehende Blasfreiheit der Fuge konnte durch sehr langsames Auflegen der Glasscheiben realisiert werden. Durch den Überschuss des Klebstoffes kam es vor dem Aushärten zu zeitaufwändigen Reinigungsprozessen. Die Aushärtung der großen Klebfläche wurde durch einen röhrenförmigen UV-Strahler, der eine sehr geringe Intensität besitzt, und durch eine wesentlich längere Aushärtezeit, als der Hersteller angab, homogen ermöglicht.

Die numerischen Analysen umfassten die Modellierung des Kunststoffes unter Berücksichtigung des nichtlinearen und zeitabhängigen Verhaltens. Zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens von Kunststoff wurde das generalisierte Maxwell-Modell ausgewählt. Mittels dem im Ansys implementierten Curve Fitting Modul konnten Schubmodul und Kompressionsmodul auf Grundlage experimenteller Daten bestimmt werden. Weiterhin wurden unterschiedliche Modellierungsansätze der Prony-Terme für Schub- und Kompressionsverhalten in Abhängigkeit der Zeit untersucht.

Im ersten Schritt der numerischen Analyse wurde für den Werkstoff Glas ein linear elastisches Materialverhalten angenommen, um das globale Tragverhalten des Doppel-T-Trägers im ungerissenen Zustand zu bestimmen. Eine Verifizierung der Ergebnisse konnte auf Grundlagen der Versuchsergebnisse durchgeführt werden. Im zweiten Schritt erfolgte die Modellierung eines Risses im Glas, der sich an den realen Trägerversuchen orientierte. Ziel war es, das Resttragverhalten im gebrochenen Zustand der Glasscheiben zu erfassen. Die Modellierung des Verformungsverhaltens und der Verbundfestigkeiten von verschiedenen Klebstoffen erfolgte mit Hilfe von Kontaktelementen zwischen Glas und Kunststoff. Drei Modellansätze wurden untersucht.

Ein erster Ansatz zur Schädigungssimulation für Hybridelement mit Rechteckquerschnitt und Doppel-T-Träger wurde an dreidimensionalen Modellen durchgeführt. Ausgehend vom Bruchenergiekonzept wurde numerisch die resultierende Kraftumlagerung bestimmt. Eine Verifizierung des Modells erfolgte mittels Kraft-Verformungs-Kurve und Bruchbild.

Zur Charakterisierung des Langzeittragverhaltens der Hybridquerschnitte wurde eine Parameterstudie für einen biegebeanspruchten Träger in Abhängigkeit der Zeit, Glasdicke, Kunststoffdicke, Steghöhe, Gurtbreite und Last durchgeführt. Ein Vierpunkt-Biegeversuch diente als Grundlage, um Aussagen zu maximal auftretenden Zugspannungen, insbesondere im Glas, und zur zeitabhängigen Durchbiegung des Trägers zu erlangen. Unter Berücksichtigung des nichtlinearen zeitabhängigen Materialverhaltens von Kunststoff konnten grundlegende Aussagen zur weiterführenden Optimierung des Querschnittes erzielt werden.

3.2.2 TU Dresden - Institut für Baukonstruktion

In einer ersten Recherche wurden zunächst die möglichen Einsatzgebiete für transparente Hybridelemente aus Glas und Kunststoff zusammengestellt. Die Hybridelemente sollen in ihrer Scheibenebene Lasten abtragen. Damit sind sie den strukturbildenden Bauelementen zuzuordnen. Aufgrund der stabförmigen Ausbildung ist die Verwendung als Stützen, Schwerter und Balken möglich, welche wiederum in hierarchischen und nicht hierarchischen Systemen zu Tragwerken zusammengesetzt werden. Die Recherche zeigte die vermehrte Anwendung von biegebeanspruchten Balken aus Glas, die bisher als Rechteckquerschnitte aus

Verbund-Sicherheitsglas (VSG) hergestellt werden und ihre Anwendung in Glasdächern im Innen- und Außenbereich, bei Glasböden und -brücken sowie in Rahmen-, Bogen- und Trägerrostkonstruktionen finden. Einen weiteren großen Bereich unter den strukturbildenden Glaselementen nehmen die Glasschwerter ein, die aufgrund der Normalkraftbelastung den Stützen zuzuordnen sind, aber auch Biegebelastungen aus der Fassade aufnehmen. Reine Raumstützen sind bisher eine relativ seltene Anwendung. Hauptaugenmerk in den Untersuchungen wurde auf biegebeanspruchte Glasbalken gelegt, da hier besonderer Bedarf zur Optimierung der Resttragfähigkeit vorhanden ist.

Maßgebend für die Belastbarkeit eines hybriden Glasträgers ist die Zugfestigkeit des Glases. Im hier untersuchten Fall der Belastung um die starke Achse handelt es sich dabei um die Zugfestigkeit der Glaskante, bei der von geringeren Werten als in der Glasfläche ausgegangen werden muss. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden die Festigkeitswerte von Glaskanten normal gekühlter Gläser verschiedener Qualität geprüft und beurteilt. Glaskanten thermisch vorgespannter Gläser wurden nicht untersucht, da die Oberflächen und damit auch die Kanten unter derartig hohen Druckspannungen stehen, dass es im Gebrauchslastbereich nicht zu einem Angriff von Zugspannungen an der Oberfläche kommt. Damit sind alle an der Oberfläche vorhandenen Defekte, Mikrorisse, Kerben überdrückt und unterkritisches Risswachstum findet nicht statt. In Vierpunkt-Biegeversuchen wurden über 90 Floatgläser verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Kantenbearbeitungen untersucht. Diese Untersuchungen an $d = 8$ mm dicken Floatgläsern mit den Abmessungen von $l \times h = 1100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ wurden in Anlehnung an die DIN EN 1288-3 durchgeführt. Die Gläser wurden allerdings nicht liegend sondern stehend belastet, wie es im Einsatz als Biegeträger auch der Fall sein wird. Bei den untersuchten Kantenqualitäten handelte es sich um

- 2 Prüfserien mit gebrochener und gesäumter Kante,
- 3 Prüfserien mit geschliffener Kante,
- 3 Prüfserien mit polierter Kante und
- 1 Prüfserie mit geschliffener und anschließend durch Korundberieselung vorgeschädigter Kante.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde die Herstellung der großflächigen Klebung zwischen Glas- und Kunststoffscheiben erprobt. Dies wurde an 62 Prüfkörpern der Abmessung $1100 \times 150 \text{ mm}$ bzw. $1100 \times 100 \text{ mm}$ sowie an 50 Prüfkörpern der Abmessung $500 \times 50 \text{ mm}$ durchgeführt, deren Herstellung für die Durchführung von Kurz- und Langzeitversuchen sowie Klimawechselbeanspruchungen erfolgte. Nach Rücksprache mit dem Klebstoffhersteller sollte die Klebschichtdicke für derartig große Flächen zwischen 0,5 und 1 mm liegen. Gewählt wurden Klebschichtdicken von 0,5, 0,8 und 1,0 mm. Aufgrund der geringen Klebschichtdicke stellte sich eine händische Befüllung mittels Kanüle und Dosiergerät als unpraktikabel heraus. Wegen des geringen Drucks des Dosiergerätes und der großen Fläche ist eine derartige Befüllung mit einem unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand verbunden, was vor allem bei UV- und lichterhärtenden Acrylaten problematisch ist. Diese stellten aber aufgrund ihrer Transparenz und gerade wegen des Vorteils der schnellen Aushärtung die bevorzugten Klebstoffe dar. Daher erfolgte der Auftrag des Klebstoffs mit Überschuss flächig oder in Raupenform auf eine Scheibe und wurde durch Auflegen der zweiten Scheibe verteilt. Bei sehr niedrigviskosen Klebstoffen war der Klebstoffauftrag auf diese Weise sehr gut durchführbar, sehr hochviskose Klebstoffe hingegen lassen sich nur schlecht und mit optischen Einschränkungen

gen verteilen. Bei der Aushärtung der großen Klebflächen konnte festgestellt werden, dass mit deutlich geringeren Strahlungsintensitäten und dafür längeren Aushärtezeiten gearbeitet werden muss, als es eigentlich für die Klebstoffe empfohlen wird, da es sonst zu starken Schrumpferscheinungen in der Klebschicht kommt. Bezüglich der Klebtechnologie, das heißt Klebstoffauftrag und Aushärteparameter, ist noch Forschungsbedarf vorhanden.

Die Untersuchungen zu unterschiedlichen Materialausdehnungen von Glas und Kunststoff infolge unterschiedlicher Temperatúrausdehnungskoeffizienten wurden gemeinsam mit dem Projektpartner TUD-IOF durchgeführt. Hierbei wurden 23 der in den Abmessungen 500 x 50 mm hergestellten Glas-Polycarbonat-Glas-Verbunde dem Zyklus D3 – Wärme, Kälte und Feuchte-Zyklus – nach DIN EN ISO 9142 unterworfen. Variiert wurden Klebstoff (6 Klebstoffe), Klebschichtdicke (3 Dicken) sowie Oberflächenvorbehandlung (mit und ohne Pyrosil). Da die Ergebnisse aus diesen Klimawechseltests nicht zufriedenstellend waren (siehe 3.3), wurde an einigen Scheiben mit dem für die Kurzzeitversuche bevorzugten Klebstoff eine Prüfung bei hoher Temperatur nach DIN EN 12543-4 durchgeführt. Bei dieser Prüfung ist der Faktor Feuchte ausgeschaltet und die Beanspruchung erfolgt ausschließlich durch hohe Temperatur. Die Versuche zeigten, dass auch ohne Feuchtebeanspruchung ein Versagen der Klebschicht stattfindet. Dieses Versagen ist somit auf die starken Längenänderungen infolge Temperatúrausdehnung und weniger auf den Eintritt von Feuchtigkeit in die Klebschicht zurückzuführen. Mittels eines Klimawechseltests nach DIN EN 1279-3 bei einer weiteren Prüfsérie mit Scheiben mit dem für die Kurzzeitversuche bevorzugten Klebstoff wurde die Dauerhaftigkeit des Klebverbundes bei einem stärker eingegrenzten Temperaturbereich bis maximal $T = +53^{\circ}\text{C}$ untersucht.

In einer ersten Prüfsérie im Vierpunkt-Biegeversuch unter Kurzzeitbelastung wurden üblicherweise verwendete VSG-Träger aus dreifach Floatglas mit Abmessungen von 1100 x 150 mm mit geklebten Glas-Polycarbonat-Glas-Verbunden mit gleichen Abmessungen und Rechteckquerschnitt hinsichtlich Trag- und Resttragfähigkeit verglichen. Die Glasdicken waren in beiden Trägerarten gleich (Hybridträger 2 x 6 mm Glas, VSG 3 x 4 mm Glas) und die Polycarbonatdicke in den Hybridträgern betrug $d = 4$ mm. Die Versuche sollten einem prinzipiellen Verständnis des Trag- und Resttragfähigkeitsverhaltens dieser Elemente dienen. Dazu wurde die Belastung mit einer konstanten Geschwindigkeit ($v = 100$ N/s) bis zum Bruch des Glases aufgebracht und Durchbiegungen der Träger sowie Spannungen im Glas und zum Teil auch Polycarbonat mittels Dehnungsmessstreifen aufgenommen. Weitere Kurzzeitversuche mit gleichem Versuchsaufbau wurden an Hybridträgern mit variierender Polycarbonatdicke (zusätzlich $d = 2$ und $d = 3$ mm) und verändertem Querschnitt ($h = 100$ mm) durchgeführt. Dabei wurde auch die Breite des Bereichs zwischen den Lasteinleitungen variiert und somit der Bereich der konstant anliegenden Zugspannung am unteren Rand der Träger. Schließlich wurden auch thermisch vorgespannte Gläser (ESG, TVG) bei Variation oben genannter Parameter im Vierpunkt-Biegeversuch untersucht. Neben dem Vergleich der Bruchspannungen mit denen der Träger mit Floatglas war hier vor allem das Resttragfähigkeitsverhalten infolge des veränderten Bruchbilds der vorgespannten Gläser von großem Interesse. Vierpunkt-Biegeversuche an reinen Polycarbonatscheiben dienten einem Vergleich mit der Durchbiegung der Hybridträger im Resttragfähigkeitsfall, wenn beide Glasscheiben zerstört sind.

Da die Kurzzeitversuche nur eine geringe Auskunft über den Einfluss des Polycarbonats auf das Tragverhalten des Trägers erlauben, wurden Langzeitversuche mit gleichen Trägerabmessungen und Versuchsparametern wie bei den Kurzzeitversuchen durchgeführt. Lediglich eine Untersuchung von Trägern mit vorgespanntem Glas fand in den Langzeitversuchen nicht statt. Die statische Belastung wurde ebenfalls in Form von Vierpunkt-Biegung für mindestens $t = 1000$ h auf die Träger aufgebracht und erzeugte eine Zugspannung an der Unterkante des Glases von etwa $\sigma = 13 \text{ N/mm}^2$ (Querschnittshöhe $h = 150 \text{ mm}$) bzw. $\sigma = 15 \text{ N/mm}^2$ (Querschnittshöhe $h = 100 \text{ mm}$). Diese lag somit etwas höher als die momentan zulässige Zugspannung für Floatglas im Überkopfbereich. Im Verlauf der Belastungsdauer wurden die Verformungen des Trägers aufgenommen. Nach Ablauf der Standzeit von mindestens $t = 1000$ h wurde ein Glas des Hybridträgers unter anhaltender Belastung planmäßig angeschlagen. Der Träger verblieb in diesem Zustand weitere 24 h unter Last. Nach Ablauf dieser Zeit wurde auch die zweite Glasscheibe des Hybridträgers planmäßig zerstört und eine weitere Standzeit von 24 h unter voller Belastung durchgeführt.

3.2.3 TU Dresden - Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik

3.2.3.1 Werkstoffuntersuchungen

Klebstoffrecherche

Die durchgeführte Klebstoffauswahl orientierte sich am Anforderungsprofil geklebter Glas-Kunststoff-Hybridelemente. Das Anforderungsprofil setzte sich aus einer hohen Transparenz in Kombination mit einer hohen Klebfestigkeit, niedrigen Viskosität und geringen Klebstoffschwindung zusammen. Weitere Eigenschaftsmerkmale sollten eine einfache Applikation des Klebstoffs durch Bevorzugung von 1K-Systemen, geringe Aushärtezeiten und Lösemitteelfreiheit beinhalten. Für die notwendige (Alterungs-)Beständigkeit ist eine Temperatur-, Witterungs- und UV-Stabilität notwendig, welche charakteristischen Umweltbedingungen in Mitteleuropa entsprechen.

Die Liste der untersuchten Klebstoffe umfasst sieben Klebstoffe auf Acrylat- und Epoxidbasis, welche sich in der chemischen Basis, Farbe, Aushärungszeit, Vernetzungswellenlänge und Viskosität voneinander unterscheiden. Der optimale Klebstoff für die abschließende Experimentalkonstruktion ermittelte sich aus Festigkeits- und Alterungsuntersuchungen an Kleinbauteilversuchen.

Klebtechnologien

Die ausgewählten Klebstoffe zeichneten sich vorwiegend durch eine Aushärtung mittels photoinitiiertem Reaktion aus. Bei der Auslegung des Aushärteregimes war die Wellenlänge, Strahlungsintensität sowie Bauteildicke und -zusammensetzung der verwendeten Glas- und Kunststoffmaterialien zu berücksichtigen.

Oberflächencharakterisierung

Die Untersuchung der ausgewählten Materialien bzgl. des Kontaktwinkels und der Oberflächenrauheit unterstützte die Auswahl der geeigneten Vorbehandlungsmethode für die Klebstellenvorbereitung. Das zu erwartenden Benetzungsverhalten konnte anhand der ermittelten Oberflächenenergien und Aufschlüsselung in polare und disperse Anteile abgeschätzt werden. Weiterführende Untersuchungen mittels FTIR, REM/EDX und XPS gaben zudem Auskunft über den chemischen Oberflächenzustand der ausgewählten Materialien.

Prüfkörperversuche

Die Prüfkörperversuche orientierten sich an kleinteiligen Geometrien der verwendeten Glas- und Kunststoffwerkstoffe sowie der ausgewählten Klebstoffe für die Herstellung einseitig überlappter Druckscherprüfkörper. Die Prüfungen der Material-/Klebstoffkombinationen erfolgten zerstörend an ungealterten und in diversen Prüfverfahren gealterten Prüfkörpern nach der DELO-Industrienorm 5. Die Prüfgeschwindigkeit betrug $v = 10 \text{ mm/min}$.

3.2.3.2 Untersuchungen am Verbundwerkstoff

Herstellung Verbundscheiben

Das großflächige Kleben von Verbundscheiben verfolgte das Ziel, das Verhalten des Klebstoffs während der Aushärtung (Schrumpf) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Klebverbund (Spannungen) zu prüfen. Die Verbundscheiben für die durchgeführten Versuche bestanden aus 500 x 50 mm großen Einzelplatten aus Glas bzw. Kunststoff. Eine variable Klebschichtdicke kompensierte die Eigenspannungen im Klebverbund und glich Toleranzen zwischen den Glas- und Kunststoffplatten aus.

Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Die Beständigkeit der geklebten Hybridverbunde wurde im Klimatest durch Temperaturänderung und Feuchtigkeitsbelastung nach DIN EN ISO 9142 - Zyklus D3 geprüft. Die Bewertung des Klebverbundes erfolgte durch optische Prüfung. Dabei wurden Delamination, Transparenz und sonstige optisch sichtbare Veränderungen berücksichtigt.

Die Auswirkungen der Alterung auf die inneren Spannungen des Klebverbundes wurden durch eine optische Spannungsanalyse (IKI Weimar) dargestellt.

Untersuchungen Kunststoff-Kantenschutz

Für den Kantenschutz des Hybridverbundes wurden Versuche mit verschiedenen CVD-Verfahren unter Verwendung mikrowellenangeregter Plasmen und Gleichspannungs-Bogenentladungsverfahren eingesetzt. Ziel war die Schaffung einer festen Beschichtung auf der Schmalfläche des Sandwich-Verbundes zum Schutz vor eindringenden Medien (z. B. Wasser).

3.2.4 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.

Der Arbeitsplan des TITK wurde während der Projektdurchführung eingehalten. Geringfügige Abweichungen traten hinsichtlich der eingesetzten Verarbeitungsverfahren auf. So konnten beispielsweise größere Platten verschiedener Materialien bereits mit sehr guter Oberflächenqualität beschafft werden. Die Herstellung im Form- oder Fließpressverfahren führte nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis. Von daher hat man sich bei der Verarbeitung von Formmassen auf den Einsatz der Spritzgusstechnik konzentriert.

Lediglich bei der Herstellung und Untersuchung von Composites wurden alternative Verfahren (Wickeltechnik, Formpressen) angewendet. Hierzu ist allerdings zu sagen, dass sich die hergestellten Verbunde aufgrund ihrer optischen und auch bruchmechanischen Eigenschaften nicht für den angestrebten Einsatzzweck eignen: Die eingearbeiteten Glasfasern führen zum einen zu einer reduzierten Transparenz bis hin zur Opazität. Des Weiteren weisen diese Verbunde (u. a. in Verbindung mit Duromeren) eine Bruchdehnung unterhalb von 10% auf. Dieser Grenzwert wurde jedoch zu Beginn der Arbeiten von allen Partnern als eines der Ausschlusskriterien bei der Kunststoffauswahl festgelegt.

3.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

3.3.1 Bauhaus-Universität Weimar - Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Die Untersuchungen wurden entsprechend des Arbeitsplanes sowohl numerisch als auch experimentell für unterschiedliche Querschnitte als auch für Verbindungsvarianten durchgeführt. Grundlage bildeten dazu die in den anderen Arbeitsgebieten erzielten Erkenntnisse und erarbeiteten Daten.

Schwerpunkte der experimentellen Analysen waren:

- Erfassung des Klebeigenspannungszustandes sowie die Veränderungen infolge Klimatests und Wasserlagerung,
- Durchführung von Traglastversuchen an Doppel-T-Trägern für Kurz- und Langzeitbeanspruchungen,
- Ermittlung der Last-Verformungs-Kurven von Verbindungsvarianten der Rahmen-ecke.

Schwerpunkte der numerischen Analysen waren:

- prinzipielle Abbildung der mehrschichtigen Querschnitte unter Nutzung realitätsnaher Materialmodelle, insbesondere für Kunststoffe und Klebstoffe,
- Beschreibung von Beanspruchungsumlagerungen an Rissen im Glas,
- Darstellung des zeitabhängigen Verhaltens von Trägern für unterschiedliche Kunststoffe,
- Optimierung der Querschnittsgestaltung von Doppel-T-Trägern,
- Ermittlung des Spannungszustandes und Bewertung geometrischer und materialspezifischer Einflussgrößen der Rahmenecken.

Zur Bewertung des Klebeigenspannungszustandes wurde der spannungsoptische Gangunterschied verwendet, da der photoelastische Koeffizient der Klebstoffe unbekannt ist. Untersuchungen zur Bestimmung des photoelastischen Koeffizienten gestalteten sich aufgrund der geringen Klebstoffdicken schwierig. Qualitative Aussagen lassen sich durch die zerstörungsfrei und flächig ermittelte Darstellung in Falschfarben für ausgewählte Klebstoffe nach dem Klebprozess und nach Klimatestversuchen bzw. Wasserlagerung erzielen. Im Randbereich zeigten alle untersuchten Klebstoffe - Delo PB 4442, Vitralit 6127, Photowell 1012 - einen inhomogenen Verlauf des spannungsoptischen Gangunterschiedes. Der Klebstoff Vitralit 6127 weist gegenüber den beiden anderen Klebstoffen einen deutlich extremeren Verlauf in einem ca. 50 mm langen Bereich vom Rand auf. Ein homogener Verlauf stellt sich in Abhängigkeit der Klebstoffdicke bei den mit Delo PB 4442 und Photowell 1012 geklebten Proben im mittleren Bereich ein. Dagegen waren bei den mit Vitralit 6127 geklebten Proben im mittleren Bereich generell höhere spannungsoptische Gangunterschiede an den beiden Rändern als in der Mitte festzustellen (Abbildung 1).

Die Untersuchungen an Proben mit einer sehr dünnen Klebfuge verdeutlichen den großen Einfluss der Klebstoffdicke und einer ungleichmäßigen Aushärtung auf den Klebeigenspannungszustand. Lokale Unterschiede, die sich durch Unebenheiten des Glases oder des Kunststoffes bzw. unterschiedliche Klebstoffdicken ergeben, konnten festgestellt werden.

Beispielsweise erzeugte eine große Klebstoffdicke einen großen spannungsoptischen Gangunterschied.

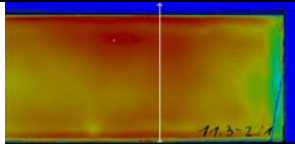
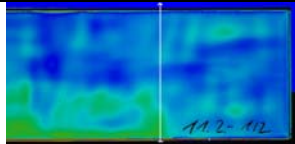
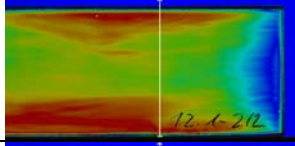
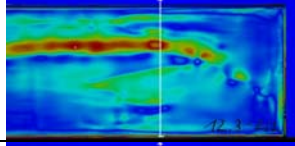
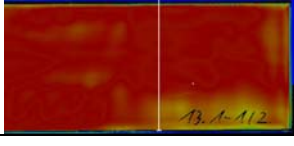
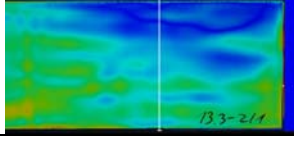
Klebstoff	Verlauf des spannungsoptischen Gangunterschiedes bei	
	gleichmäßiger Aushärtung	ungleichmäßiger Aushärtung
DELO PB 4442		
Vitralit 6127		
Photowell 1012		

Abbildung 1: Beispiele für Klebeigenspannungen

Die verwendete bildgebende Messmethode ist geeignet, um sehr schnell und zerstörungsfrei Qualitätskontrollen der transparenten Klebverbindung durchzuführen. Es konnte gezeigt werden, dass deutliche Veränderungen in der Klebschicht insbesondere im Randbereich infolge der Klimawechselbeanspruchung zwischen $T = -20^{\circ}\text{C}$ und $T = +75^{\circ}\text{C}$ bei allen geklebten Proben vorhanden waren. Zum Teil traten Delaminationerscheinungen auf, die ebenfalls im Verlauf des spannungsoptischen Gangunterschiedes durch einen Sprung erkennbar waren.

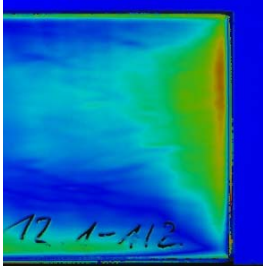
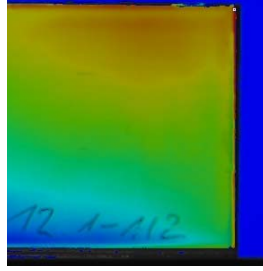
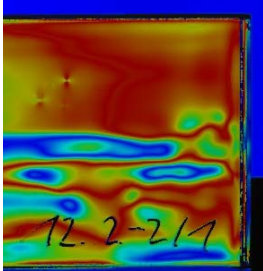
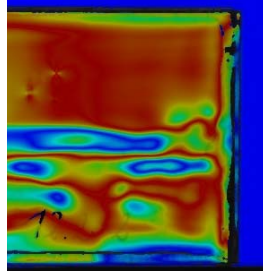
	Verlauf des spannungsoptischen Gangunterschiedes im Randbereich	
	nach Klebprozess	nach Versuch
Test: Klimawechselbeanspruchung Probe: $l = 500 \text{ mm}$ $b = 50 \text{ mm}$ $d_{\text{Glas}} = 4 \text{ mm}$ $d_{\text{PC}} = 4 \text{ mm}$		
Test: Wasserlagerung Probe: $l = 250 \text{ mm}$ $b = 50 \text{ mm}$ $d_{\text{Glas}} = 4 \text{ mm}$ $d_{\text{PC}} = 4 \text{ mm}$		

Abbildung 2: Erfassung der Veränderungen in der Klebfuge durch spannungsoptische Messungen

Veränderungen in der Klebfuge infolge der Wasserlagerung, die zur Überprüfung der Wirksamkeit des Kantenschutzes beim TITK durchgeführt wurden, konnten unabhängig vom Klebstoff und Lack nicht festgestellt werden.

Mit Hinblick auf eine Optimierung der Querschnitte wurde versucht, praxisgerechte Träger herzustellen. Dabei war insbesondere das Verhältnis von Steg- zu Gurtflächen sowie die Verbindung zwischen Steg und Gurt zu optimieren und die gewonnenen Erkenntnisse aus der Qualität der Glaskanten in der Gesamtkonstruktion zu berücksichtigen. Die Versuchsserie umfasste 22 Träger mit zwei verschiedenen Querschnitten (Abbildung 3).

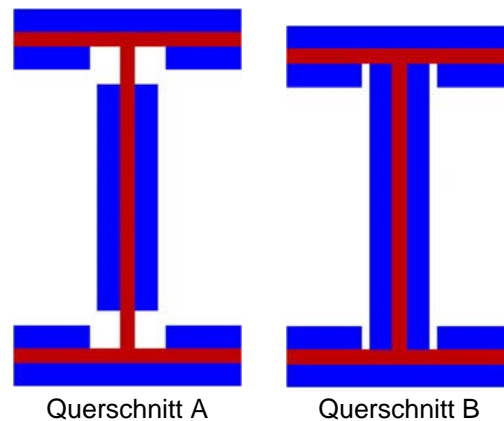


Abbildung 3: Varianten eines Hybridträgers

Die unterschiedlichen Höhen der Träger ergaben sich durch die Forderung, dass beide Querschnitte gleich große Trägheitsmomente unter Berücksichtigung von Glas und Kunststoff aufweisen sollten, um den Einfluss der Verbindung zwischen Steg und Gurt auf das Tragverhalten zu untersuchen.

Die Beanspruchung erfolgte als Vier-Punkt-System, um über eine definierte Strecke einen möglichst konstanten Beanspruchungszustand im ungerissenen Zustand zu erreichen (Abbildung 4).

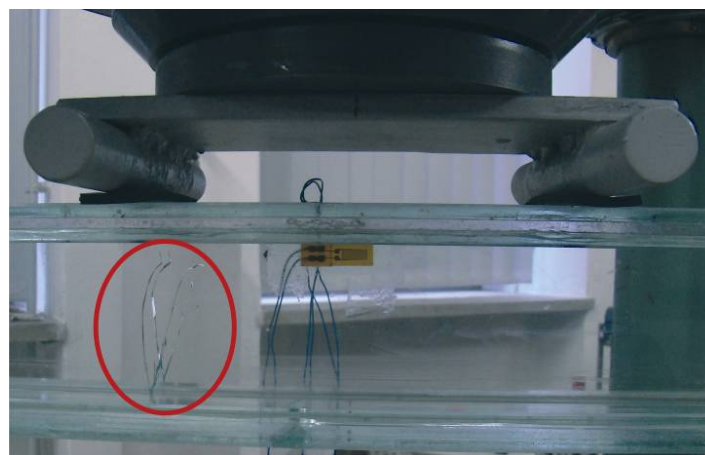


Abbildung 4: Träger im Vier-Punkt-Biegeversuch mit Riss im Glas-Stegelement

Es zeigte sich, dass in allen Fällen erste Spontanbrüche an den zugbeanspruchten Rändern der Glas-Stegelemente auftreten (Abbildung 4). Die Höhe der Beanspruchung vor dem Bruch liegt in den erwarteten Größenordnungen. Die bisher beobachtete Schwankungsbreite der erreichten Randspannungen ist geringer als die aus den Glaskantenversuchen gefundene (Tabelle 1 bis 3). Es kann vermutet werden, dass die Interaktion Glas-Klebstoff-Kunststoff eine Glättung extremer Kerbwirkungen bewirkt. Ein Initialbruch der Glaselemente an den Gurten lässt sich nur in seltenen Fällen erreichen. Risse in den zugbeanspruchten Glas-Gurtelementen treten erst bei deutlicher Steigerung der Lasten auf. Weiterhin zeigten die Versuche, dass der Träger mit dem Querschnitt B eine wesentlich höhere Maximaltraglast und eine größere Steifigkeit als der Träger mit dem Querschnitt A aufweist. Die Verbindung des Stegglases an den Gurtkunststoff trägt wesentlich zur Schubübertragung und somit zur Verbesserung des Tragverhaltens bei.

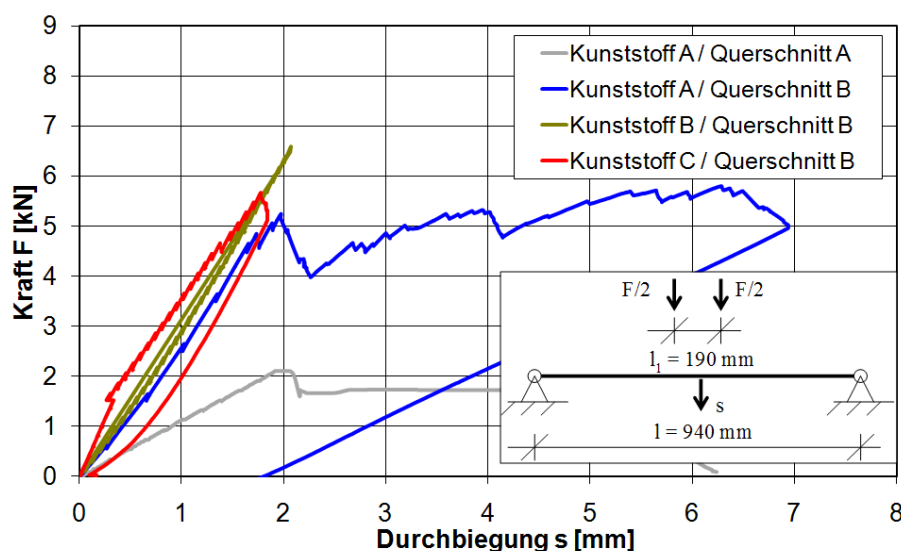


Abbildung 5: Last-Verformungs-Kurven eines Hybridträgers im Vier-Punkt-Biegeversuch – Kurzzeituntersuchungen

In den Versuchen zum Kurzzeittragverhalten konnte festgestellt werden, dass der Kunststoff eine hohe Schlagzähigkeit besitzen muss, um die frei werdende Energie, die beim Bruch des Stegglases in Millisekunden auftritt, aufzunehmen. Es zeigte sich, dass der Kunststoff Polycarbonat sehr gut geeignet ist, um die schlagartige Lastumlagerung zu ertragen und weiterhin eine hohe Tragfähigkeit aufzuweisen. Die Größe der Ablösungen zwischen Glas und Kunststoff um den Riss war abhängig vom Klebstoff. In diesem Bereich konnte aufgrund der fehlenden Verbundwirkung keine Kraftübertragung mehr erfolgen. Dennoch bleiben in allen Kurz- und Langzeituntersuchungen die gebrochenen Glaselemente am Kunststoff haften.

Wichtig ist die Feststellung, dass eine relativ hohe Resttragfähigkeit der Träger vorhanden ist. Nach dem Bruch ist zwar ein Tragfähigkeitsabfall zu beobachten (Abbildung 5), die Last lässt sich jedoch wieder steigern und über einen längeren Zeitraum halten. Wird die Last nach dem ersten Bruch reduziert, können relativ hohe Beanspruchungen über einen sehr langen Zeitraum aufgebracht werden (Abbildung 6).

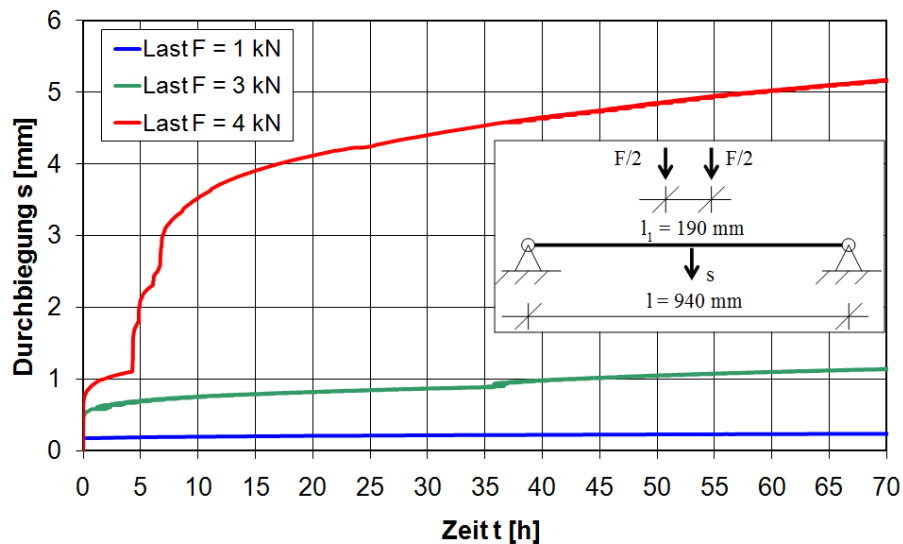


Abbildung 6: Last-Verformungs-Kurven eines beschädigten Hybridträgers im Vier-Punkt-Biegeversuch
- Langzeituntersuchungen

Die Untersuchungen an Verbindungsmöglichkeiten zwischen Hybridelementen wurden exemplarisch an zwei Typen von Rahmenecken durchgeführt. Zur Analyse des Tragverhaltens erfolgte sowohl die Bestimmung der Kraft-Verformungs-Kurven als auch die Erfassung des spannungsoptischen Gangunterschiedes im Verbindungsbereich der geometrisch verkleinerten Rahmenecken.

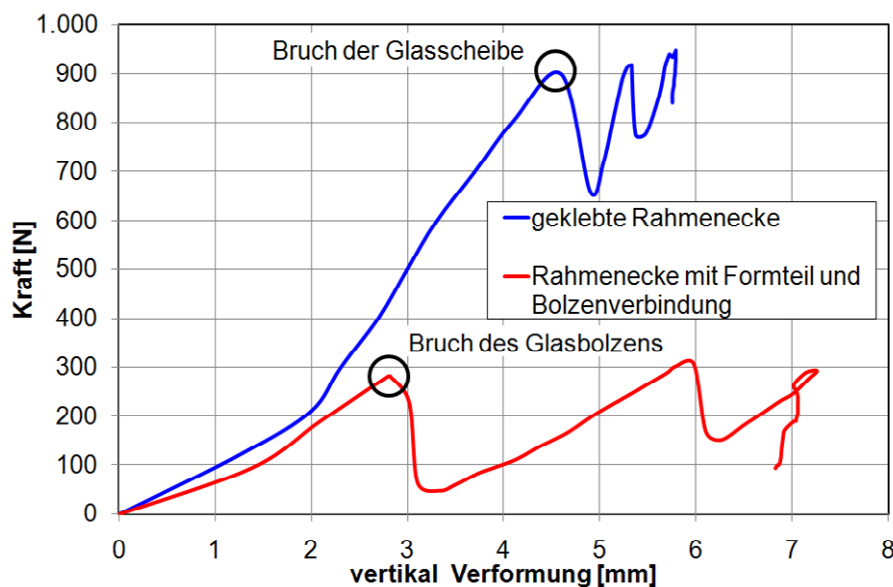


Abbildung 7: Kraft-Verformungs-Kurven von zwei unterschiedlichen Verbindungsvarianten (links) und Versuchsaufbau (rechts)

Es zeigte sich, dass die geklebte Rahmenecke eine höhere Tragfähigkeit als die Rahmenecke mit wasserstrahlgeschnittenen Formteilen und lösbaren Bolzenverbindungen aufweist (Abbildung 7). Bei allen geklebten Rahmenecken kam es mit zunehmender Laststeigerung zu einer vermehrten irreversiblen Schädigung der zugbeanspruchten Klebschicht und Tren-

nung zwischen Glas und Kunststoff Abbildung 8). Das Versagen der Rahmenecke trat durch Bruch des Glases im Auflagerbereich des Stiels auf.

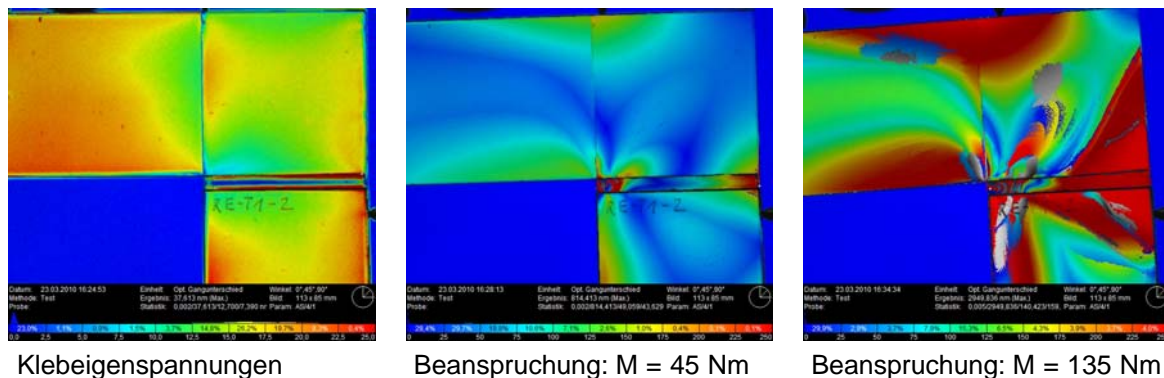


Abbildung 8: Verlauf des spannungsoptischen Gangunterschiedes in der geklebten Rahmenecke nach dem Klebprozess und während des Versuches

Es konnte festgestellt werden, dass die Formteile und Bolzen aus Kunststoff geeignet sind, um eine lösbare Verbindung herzustellen. Die Tragfähigkeit aufgrund des geringen E-Moduls gegenüber einer vollständig geklebten Rahmenecke ist deutlich reduziert. Eine Verbesserung der Tragfähigkeit durch Verwendung des Werkstoffes Glas konnte nicht erzielt werden. Lokale Zugspannungsspitzen insbesondere an den wasserstrahlgeschnittenen Löchern der Formteile bzw. an der Bolzenoberfläche führten zum schnellen Versagen der Verbindung (Abbildung 15).

Die numerische Simulation des Klebstofftragverhaltens erfolgte aufgrund der relativ geringen Dicke im Bezug auf die Glas- und Kunststoffscheiben mit Interface- und Kontaktelementen, die vom FE-Programm Ansys zur Verfügung gestellt werden. Für Druckscherversuche, die mit den Klebstoffen Delo PB 4442, Vitralit 6127, Photowell 1012 durchgeführt wurden, konnte das Kraft-Verformungs-Verhalten ansatzweise numerisch simuliert werden. In den Untersuchungen zeigte sich, dass bei Verwendung von Kontaktelementen das Verhalten der Klebschicht sehr stark von der Netzgestaltung abhängt. Eine Übertragung der beschreibenden Modellparameter, die an Druckscherversuchen kalibriert wurden, auf biegebeanspruchte Elemente zur Simulation des Kohäsions- und Adhäsionsverhaltens wurde kritisch gesehen. Weiterhin sind bei den zur Verfügung stehenden Interfaceelementen die zwangsweise koinzident zu beschreibenden Knotenpaare insbesondere bei größeren dreidimensionalen Strukturen problematisch. Zufriedenstellende Ergebnisse bei der numerischen Modellierung der Klebfuge konnten nicht erzielt werden.

Für die Analyse der Rissentstehung im Werkstoff Glas wurde ein räumliches Werkstoffmodell auf Grundlage des Griffithschen Energiekonzeptes verwendet. Die Berücksichtigung des spröden Entfestigungsverhaltens erfolgte durch Ansatz einer Exponentialfunktion in Abhängigkeit der Bruchenergie für Mode I. Mit Hilfe der Untersuchungen am Institut für Baukonstruktion konnten Festigkeitswerte für unterschiedliche Kantenbearbeitungen berücksichtigt werden (Tabelle 1 bis 3). Die Einführung einer äquivalenten plastischen Dehnung ermöglichte eine Erfassung der Interaktion zwischen den Versagenszuständen Zug und Schub sowie eine Beschreibung der Entfestigung [Scheiber 2010]. Experimentell ermittelte Kraft-Verformungs-Kurven und Rissbilder, die nach dem Initialriss für einen einfachen Rechteck-

querschnitt auftraten, dienten zur Kalibrierung des numerischen Modells. Damit gelang es, Rissbildung und -wachstum für den Werkstoff Glas am Beispiel eines Rechteckquerschnittes bzw. eines Trägers zu modellieren (Abbildung 9 und Abbildung 10).

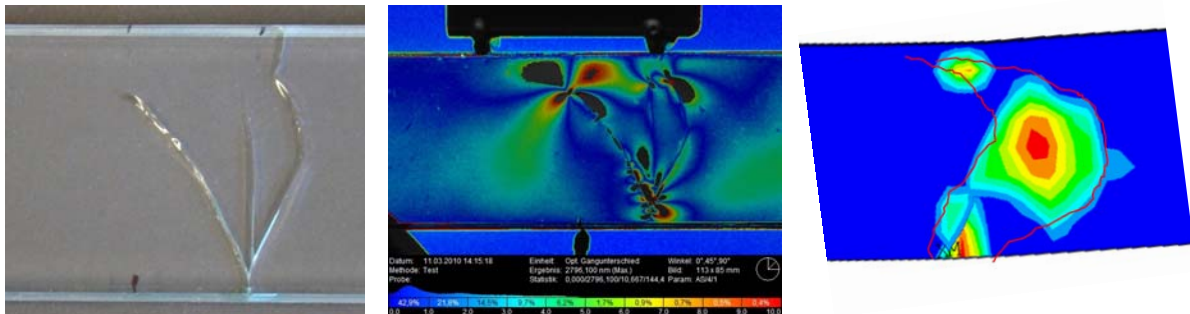
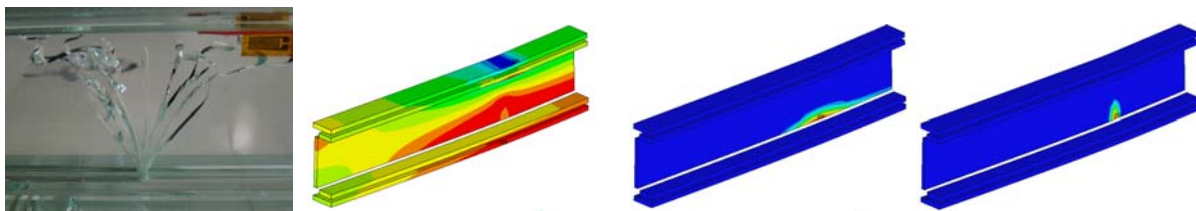


Abbildung 9: Rissbildung und -wachstum im Werkstoff Glas eines Rechteckquerschnittes



Riss im Trägersteg

Spannung in Längs-
achse

Dehnungskonzentration für zwei Zeitpunkte

Abbildung 10: Rissbildung und -wachstum im Werkstoff Glas eines Doppel-T-Trägers

Es wurde eine wesentliche Voraussetzung geschaffen, um die Resttragfähigkeit eines Hybridelementes realitätsnah in der numerischen Simulation zu bestimmen. Potenzial zur weiteren Verbesserung des Vorhersagemodells besteht bei der Erfassung der Schädigung in der Klebstoffschicht infolge der Rissbildung und -wachstum im Werkstoff Glas. Gegenwärtig existieren dazu keine geeigneten Modelle in der Literatur.

Die numerische Simulation des biegebeanspruchten Trägers zum Kurzzeittragverhalten erfolgte für den Querschnitt A und B. Hinsichtlich des Tragverhaltens ist der Querschnitt B günstiger als Querschnitt A. Die numerische Simulation konnte zeigen, dass infolge des schmalen und aus Kunststoff bestehenden Steganschlusses beim Querschnitt A der Gurt nicht ausreichend zur Tragfähigkeit beiträgt (Abbildung 11). Der Lastabtrag erfolgte weitestgehend über den Glaselementen im Stegbereich und die maximalen Längszugspannungen traten an der Unterseite des Stegs auf. Demzufolge müsste der erste Riss des Trägers im Steg auftreten. Dies konnte durch die experimentellen Untersuchungen bestätigt werden.

Eine Verbesserung der Trageigenschaften konnte bei den Untersuchungen des Querschnittes B festgestellt werden. Die Anbindung des steifen Stegglases an den weichen Gurtbereich gestattet eine optimierte Übertragung von Schubkräften, die es ermöglichen, die Gurtgläser infolge der Biegung zu beanspruchen. Ein gleichmäßigerer Spannungszustand stellte sich im Querschnitt B als im Querschnitt A ein. Die numerische Simulation verdeutlichte den Einfluss der Verbindung zwischen Steg und Gurt sowie die Kantenfestigkeit des Stegglases für ein effizientes Tragverhalten bei Hybridelementen.

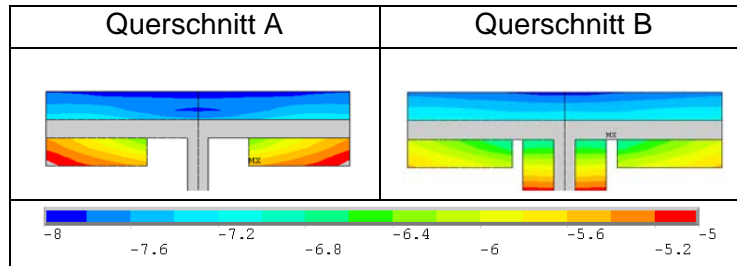


Abbildung 11: Verlauf der Längsspannung im Obergurt des Doppel-T-Trägers [N/mm²]

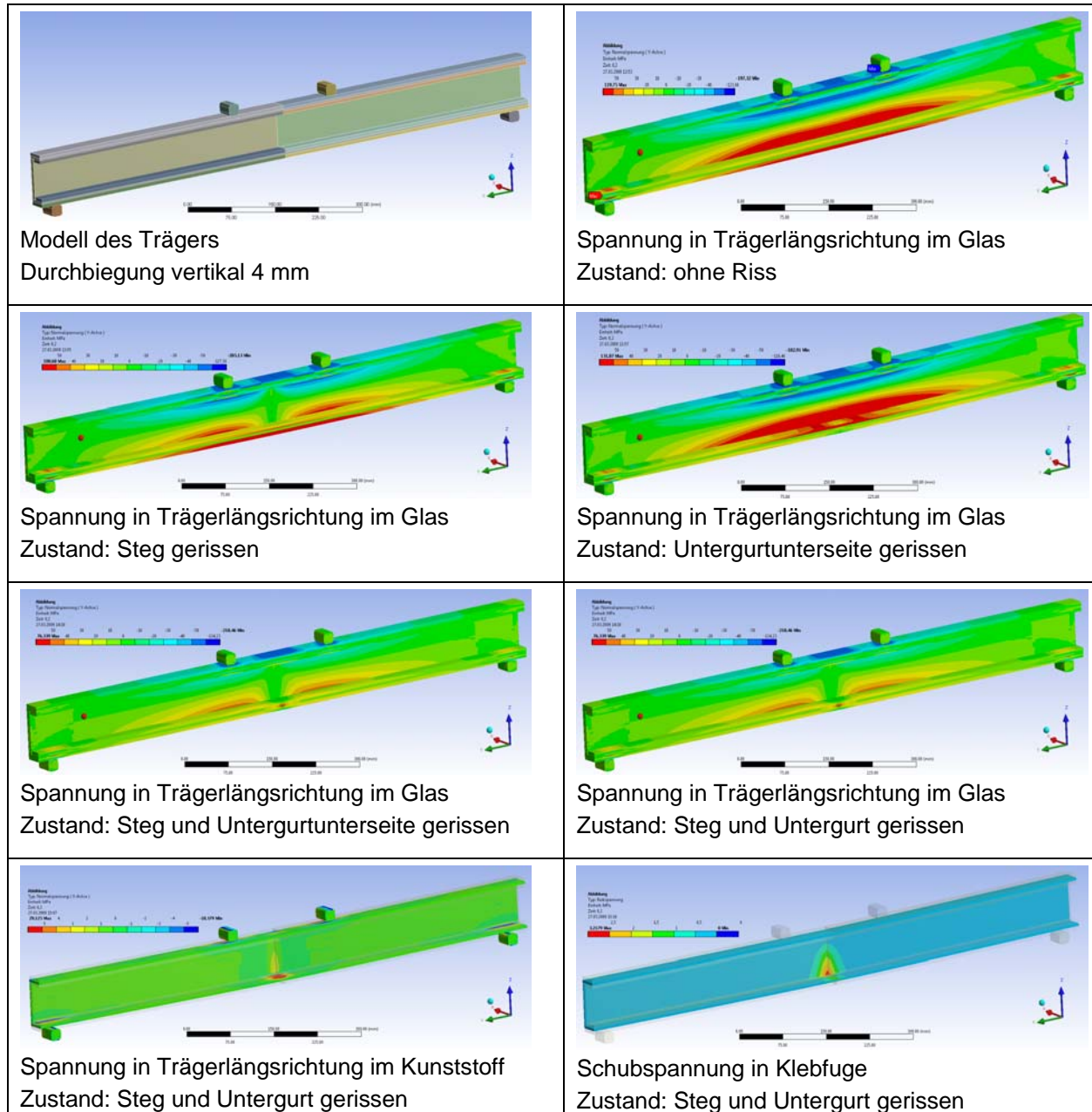


Abbildung 12: Spannungszustände eines Doppel-T-Trägers im Vier-Punkt-Biegeversuch

Mit Hilfe der numerischen Simulation gelang es, den Spannungszustand im Träger im ungerissenen und gerissenen Steg- bzw. Gurtglas zu bestimmen (Abbildung 12). Es konnte anhand einer numerischen Studie eines ungerissenen Doppel-T-Trägers bei Kurzzeitbelastung festgestellt werden, dass die maximale Zugspannung bzw. Durchbiegung am Gurt annähernd kubisch von Glasdicke, Steghöhe und Gurtbreite abhängt. Dagegen ist der Einfluss der Kunststoffdicke nahezu linear. Ebenfalls gilt, dass die Werte der maximalen Zugspannung und Durchbiegung am Gurt mit zunehmender Glasdicke, Steghöhe und Kunststoffdicke sinken, aber mit zunehmender Gurtbreite steigen. Dieses dreidimensionale Modell unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens ist geeignet, um die Resttragfähigkeit des Trägers für unterschiedliche Beanspruchungssituationen numerisch abzuschätzen.

Für Untersuchungen des Langzeitverhaltens eines Doppel-T-Trägers unter Dauerlast wurde ein viskoelastisches Werkstoffmodell für Kunststoff - generalisiertes Maxwell-Modell - verwendet. Die notwendigen Eingangsparameter zur Beschreibung des Kriechverhaltens konnten mit Hilfe einer Prony-Serie auf Grundlagen der Experimente am Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung ermittelt werden. Es gelang, den Spannungs- und Dehnungszustand im Träger numerisch zu bestimmen, der sich nach 20 Jahren Dauerlast einstellt. Die Umlagerungseffekte infolge des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens von Kunststoff sind deutlich zu erkennen (Abbildung 13).

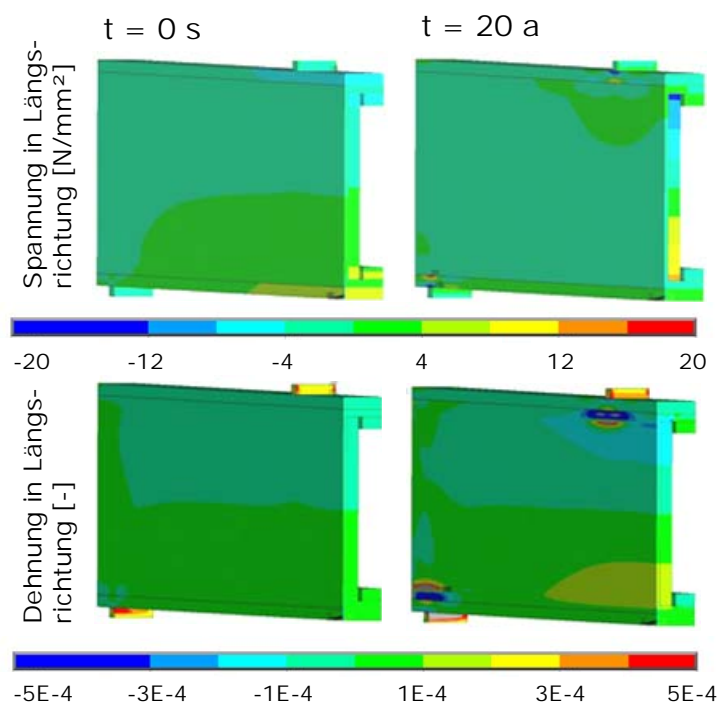


Abbildung 13: Umlagerung von Spannung und Dehnung im Viertelmodell eines Doppel-T-Trägers infolge Dauerlast und des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens

Es lässt sich feststellen, dass unabhängig von der Querschnittsform A bzw. B eine Erhöhung des Spannungszustandes im Stegglas mit zunehmender Belastungszeit eintritt. Kritisch ist der Anstieg der Zugspannungen im Glas zu beurteilen (Abbildung 14). Der Zug- und Druckgurt weist nach 20 Jahren einen geringeren Beanspruchungszustand als kurz nach Belastungsbeginn auf. Die Spannungsumlagerung ist mit einer Zunahme der Durchbiegung ge-

koppelt. Je größer die Beanspruchung und Kunststoffdicke und je kleiner die Glasdicke sind, umso größer sind Spannungsumlagerung und Durchbiegung.

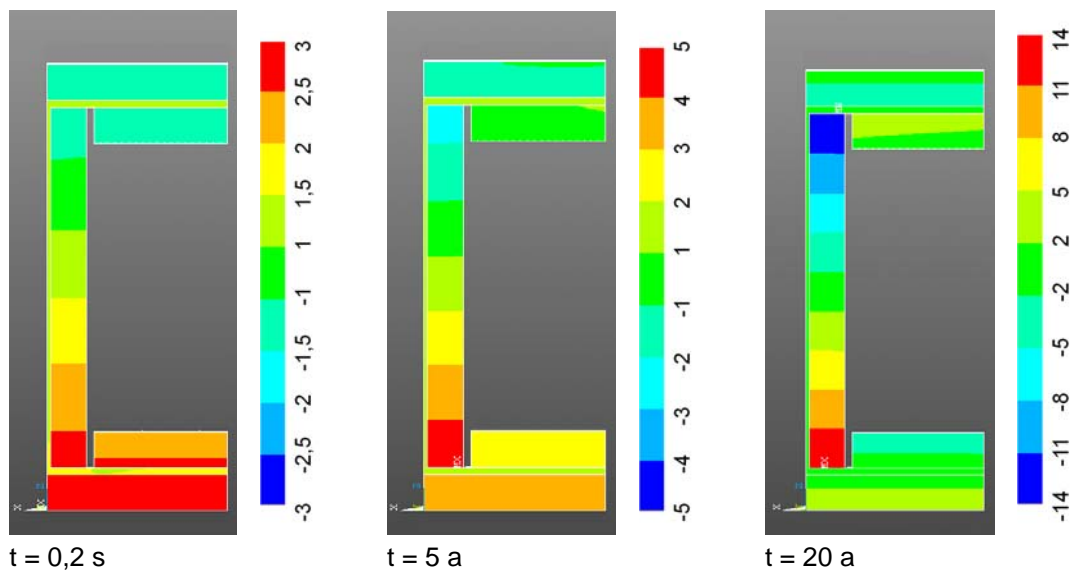


Abbildung 14: Veränderungen des Spannungszustandes im halben Doppel-T-Querschnitt für ausgewählte Zeitpunkte, $d_{\text{Glas}} = 10 \text{ mm}$, $d_{\text{PC}} = 2 \text{ mm}$, $h = 80 \text{ mm}$, $b = 100 \text{ mm}$ [N/mm²]

Erste numerische Modelle für einfache und transparente Verbindungsvarianten aus Glas und Kunststoff zwischen Stützen- und Trägerelementen wurden entwickelt (Abbildung 15). Es konnte eine sehr gute qualitative Übereinstimmung des Spannungszustandes zwischen Simulation und Experiment erzielt werden. Mit Hilfe einer numerischen Parameterstudie gelang es, eine beanspruchungsoptimierte Geometrie zu bestimmen.

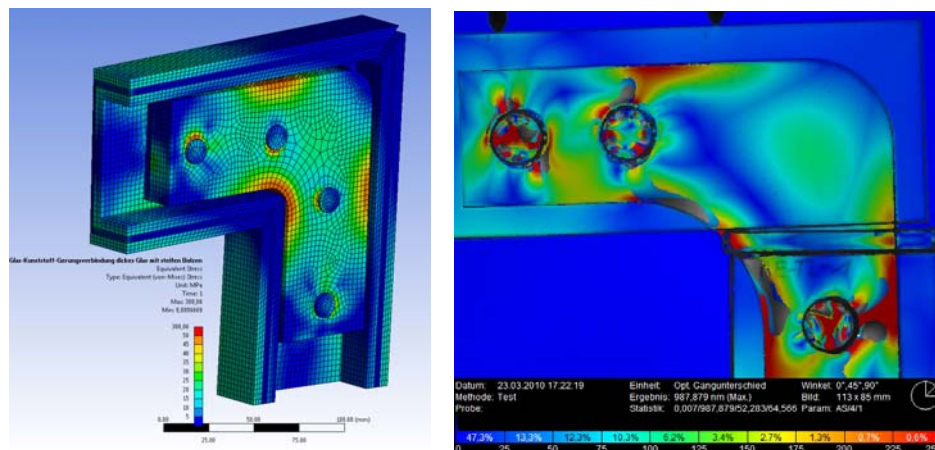


Abbildung 15: Numerische Spannungsanalyse einer Rahmenecke mit Formteil und Bolzenverbindung (links) und Verlauf des spannungsoptischen Gangunterschiedes bei $M = 30 \text{ Nm}$ (rechts)

Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass Zwischenabstand und E-Modul der Bolzen den größten Einfluss auf Spannungszustand und Verformung besitzen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass ein Optimum für den Bolzendurchmesser in Abhängigkeit der Beanspruchung vorhanden ist. Der Einfluss der Formteildicke auf die Verformung war gering.

3.3.2 TU Dresden - Institut für Baukonstruktion

Im Rahmen der Kantenfestigkeitsversuche an Floatglasstreifen konnten zunächst die Aussagen anderer Untersuchungen bestätigt werden. Das heißt, die Festigkeit des Floatglases an der Glaskante ist geringer als die Oberflächenfestigkeit auf der Plattenfläche. Weiterhin war festzustellen, dass sich die Zugfestigkeit der Scheibenkante mit zunehmender Kantenbearbeitungsqualität nicht oder nur bedingt verbessert. Es wurde deutlich, dass die Streuung der Festigkeitswerte von den Scheiben mit qualitativ schlechterer Kante zu denjenigen mit höherwertiger Bearbeitung zunimmt. So wurden bei den Scheiben mit polierter Kante zwar sehr hohe Maximalfestigkeiten erreicht und damit auch relativ hohe Mittelwerte der Festigkeit, infolge der hohen Streuung ergeben sich aber keine oder nur geringfügig bessere charakteristische Festigkeiten. Zunächst überraschend war aber die Tatsache, dass zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Scheiben der unterschiedlichen Hersteller existieren. Dieses Erkenntnis war bei vorherigen Literaturrecherchen nicht gefunden worden. Auch aufgrund des Umstands, dass die Kantenqualität genormt wurde, war man davon ausgegangen, dass man bei einer bestimmten Kantenqualität auch immer ein gleichwertiges Ergebnis erhalten würde. Rücksprachen mit Herstellern machen jedoch deutlich, dass es für die zum Teil großen Unterschiede in der Kantenfestigkeit bei unterschiedlichen Herstellern viele Gründe gibt. Zahlreiche Arbeitsschritte im Produktionsprozess, unterschiedliche Maschinen, Hilfsmittel und Werkzeuge, die darüber hinaus noch unterschiedlich stark abgenutzt sein können sowie Einflüsse aus manuellen Arbeitsschritten führen zu diesem Ergebnis. Damit muss für die Kantenfestigkeit ein unterer Grenzwert angegeben werden, der auch die schlechtesten Fälle berücksichtigt. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse müsste zudem eine noch breitere Datenbasis geschaffen werden.

REM-Aufnahmen der unterschiedlichen Kantenqualitäten, die in den Versuchen geprüft wurden, zeigten deutlich erkennbar verschiedene Strukturen.

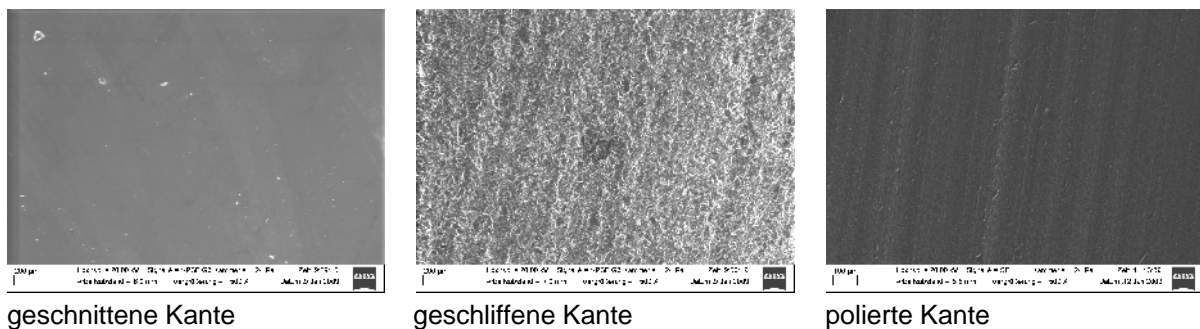


Abbildung 16: REM-Aufnahmen der Kantenoberflächen

Tabelle 1: Ergebnisse der Vierpunkt-Biegeversuche an den Scheiben von Hersteller 1

Kantenbearbeitung	Stichprobenanzahl	Mittelwert der Festigkeit [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	5%-Fraktile mit 95% Aussagewahrscheinlichkeit [N/mm ²]
Geschliffen, vorgeschädigt	9	43,52	3,96	32,68
Geschliffen	11	53,83	7,65	33,78
Poliert	10	51,39	5,39	37,67

Tabelle 2: Ergebnisse der Vierpunkt-Biegeversuche an den Scheiben von Hersteller 2

Kantenbearbeitung	Stichprobenanzahl	Mittelwert der Festigkeit [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	5%-Fraktil mit 95% Aussagewahrscheinlichkeit [N/mm ²]
Gesäumt	10	41,07	2,48	34,19
Geschliffen	9	64,88	3,14	56,00
Poliert	7	62,91	14,34	26,41

Tabelle 3: Ergebnisse der Vierpunkt-Biegeversuche an den Scheiben von Hersteller 3

Kantenbearbeitung	Stichprobenanzahl	Mittelwert der Festigkeit [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	5%-Fraktil mit 95% Aussagewahrscheinlichkeit [N/mm ²]
Gesäumt	8	49,46	2,03	43,23
Geschliffen	9	48,13	3,24	39,52
Poliert	6	56,91	6,23	37,41

Bei den Ergebnissen in Tabelle 1 bis 3 sind nur diejenigen Versuche berücksichtigt, bei denen der Bruchsprung innerhalb des Lasteinleitungsbereichs lag. Daher ergeben sich unterschiedliche Stichprobenanzahlen.

Der Klimawechselbeanspruchung und damit der starken Beanspruchung infolge großer Ausdehnungsunterschiede konnten drei von sechs Klebstoffen zum Teil standhalten, die übrigen zeigten großflächig Delaminationserscheinungen und veränderten ihr Erscheinungsbild negativ. Ein ungestörter Verbund war nicht mehr vorhanden. Bei den Klebstoffen, die den Klimawechsel überstanden, handelte es sich entweder um sehr feste Klebstoffe, die trotz der hohen Beanspruchungen in einigen Fällen die Haftung zur Glas- und Kunststoffoberfläche nicht verloren oder um einen sehr weichen Klebstoff, der entsprechend hohe Verformungen ausgleichen konnte. Bei den übrigen Klebstoffen konnte auch eine Vergrößerung der Klebschichtdicke oder eine Oberflächenvorbehandlung mit Pyrosil das Ergebnis nicht verbessern. Die Klimawechseluntersuchungen nach DIN EN 1279-3 zeigten jedoch auch bei dem für die mechanischen Versuche verwendeten Klebstoff positive Ergebnisse. Im Temperaturbereich von $T = -18^{\circ}\text{C}$ bis $T = +53^{\circ}\text{C}$ traten keine relevanten Delaminationserscheinungen auf. Damit könnte für die Verwendung derartiger hybrider Träger über eine Verwendungseinschränkung nachgedacht werden, z. B. nur im Innenbereich.

Im Rahmen der Vierpunkt-Biegeversuche mit Kurzzeitbelastung konnte zunächst gezeigt werden, dass VSG-Träger und Hybridträger mit Floatglas hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit unter Kurzzeitbelastung vergleichbar sind und kaum Unterschiede auftreten. Das Glas ist auch im Hybridquerschnitt die entscheidende Komponente. Der Vergleich beider Trägerarten nach Glasbruch zeigte die deutliche Überlegenheit der Hybridträger. Bei Glasbruch kam es in beiden Trägerarten zum vollständigen Versagen aller Glasscheiben, was bei den VSG-Trägern zum Versagen des gesamten Trägers führte. Die Hybridträger hingegen waren trotz vollständig zerstörter Glasscheiben in der Lage, erneut bis zur Bruchlast oder sogar darüber

hinaus belastet zu werden. Indem der Kunststoff die Zugspannungen im gebrochenen Träger übernimmt, kann das Glas weiterhin Druckkräfte zwischen den Rissen übertragen.

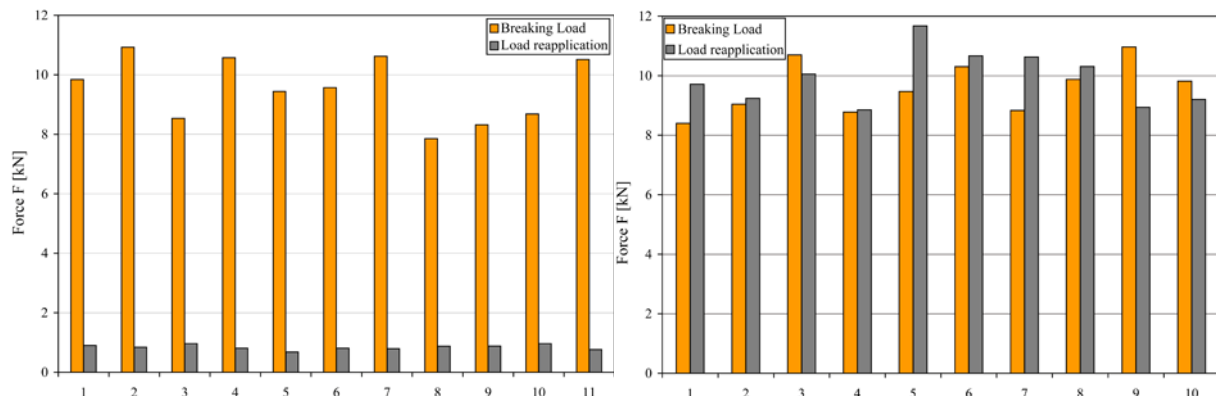


Abbildung 17: Bruchlast (orange) und Wiederbelastung nach Bruch (grau) einzelner Träger in Vierpunkt-Biegeversuchen unter Kurzzeitbelastung

Notwendig war dazu aber das vorteilhafte Bruchbild des Floatglases. Bei der Variation der Polycarbonatdicke bei gleichbleibendem Glasquerschnitt wurde deutlich, dass bereits eine Zwischenschicht von 2 mm Polycarbonat zu einer guten Resttragfähigkeit führt. Die Eigenschaft des Polycarbonats, hohe Dehnungen aufnehmen zu können, ehe es zu einem Versagen kommt, ist die entscheidende Komponente. Dazu kommt das vorteilhafte Bruchbild des Floatglases, dass eine Mitwirkung im gebrochenen Zustand zum Abtrag der Druckkräfte ermöglicht und somit auch im Bruchzustand für die notwendige Stabilität des Trägers sorgt. Vergleichsversuche mit reinen Polycarbonatscheiben zeigten deutlich, dass ohne die stabilisierende Wirkung des Glases bereits bei geringen Kräften mit einem Tragfähigkeitsverlust des Polycarbonats infolge Stabilitätsversagen zu rechnen ist. Das besondere Bruchverhalten des Floatglases im Verbund mit dem Polycarbonat zeigt sich darin, dass nur in den unteren zwei Dritteln des Glases ein typischer, fächerförmiger Biegebruch auftritt. Im oberen Drittel wenden sich die Risse einander zu und bilden eine Art „Bruchzwiebel“. Dabei bleibt am oberen Rand des Trägers ein intakter Streifen Glas vorhanden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Moment des Bruchs schlagartig das Polycarbonat die Zugkräfte am unteren Rand des Trägers übernimmt, so dass die Druckkräfte im oberen Teil weiterhin durch das Glas aufgenommen werden können. Durch die starken Druckkräfte im Glas können die Risse somit nicht bis an die Oberkante des Trägers durchlaufen.

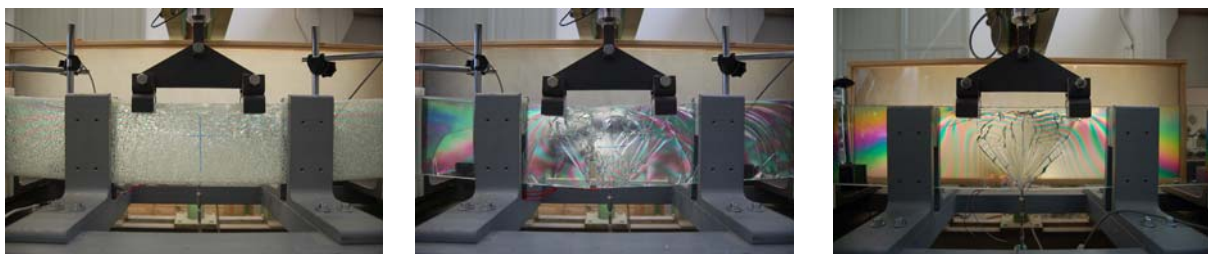


Abbildung 18: Bruchbild für drei unterschiedliche Glasarten im Vierpunkt-Biegeversuch an Glas-Kunststoff-Hybridträger

Vollständig zerstörtes Bruchbild des ESG-Trägers lässt kaum Lastabtrag zu (Abbildung 18 links). TVG-Bruchbild ist auch relativ kleinteilig, daher kann das Glas kaum Druckspannungen übertragen (Abbildung 18 mitte). Nur das Floatglas ist in der Lage, noch im gebrochenen Zustand ausreichend Druckkräfte zu übertragen, wie die Fotografie mittels Polarisationsfilter zeigt (Abbildung 18 rechts). Eine Variation der Träger hinsichtlich Höhe ($h = 100$ mm anstelle $h = 150$ mm) und verbreitertem Bereich unter konstanter Momentenbeanspruchung ($I_L = 333$ mm anstelle $I_L = 200$ mm) ergab auch positive Ergebnisse. Das vorteilhafte Bruchbild mit der intakten Druckzone kann sich auch in den deutlich schlankeren Trägern mit geringerer Höhe ausbilden. Nicht zum Erfolg führten hingegen Versuche unter Verwendung von vorgespanntem Glas bei den Hybridträgern. Da sowohl ESG als auch TVG nicht in der Lage sind, ein ähnliches Bruchbild wie Floatglas auszubilden, ist für den Resttragfähigkeitsfall die stabilisierende und Druckkraft abtragende Wirkung des Glases nur unzureichend vorhanden.

Die Langzeitversuche über mindestens $t = 1000$ h statische Belastung zeigten, dass ein Kriechen des Trägers infolge des eingebetteten Polycarbonats bei intaktem Glas nicht auftritt (Abbildung 19).



Abbildung 19: Langzeitprüfstände für Glas-Kunststoff-Hybridträger

Messungen mit DMS zeigten, dass das Glas wiederum aufgrund seiner um ein Vielfaches höheren Steifigkeit die Dehnungen des Trägers vorgibt und das Polycarbonat somit nur einen vernachlässigbaren Anteil der Last aufnimmt. Erst nach planmäßiger Zerstörung einer Glasscheibe unter anhaltender Last nahmen die Verformungen etwas zu. Ein deutliches Kriechverhalten trat aber erst nach der Zerstörung der zweiten Glasscheibe über die folgenden 24 Stunden unter gleichbleibender Last auf. Zum Versagen eines Trägers kam es dabei in keinem Fall. Die Resttragfähigkeit war in jedem Fall gegeben.

3.3.3 TU Dresden - Institut Für Oberflächen- und Fertigungstechnik

3.3.3.1 Werkstoffuntersuchungen

Klebstoffrecherche

Die Klebstoffrecherche zeigte, dass sich UV- und lichthärtende Acrylsysteme als anforderungskonforme Klebstoffe für einen hochtransparenten Glas-Kunststoff-Hybrid-Träger erweisen. In Tabelle 4 sind die Versuchsklebstoffe sowie die wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst. Aus der Vorauswahl wurde ein engerer Kreis von drei Klebstoffen ausgewählt. Diese Klebstoffe entsprachen nach den Vorversuchen am Besten dem gestellten Anforderungsprofil. Zu diesen Klebstoffen zählen der DELO PB 437, DELO PB 4442 und Photowell 1012. Bei zwei Testkandidaten (DELO VE 57639, DELO VE 57758) konnte die benötigte Transparenz nicht erreicht werden. Andere Klebstoffe wurden wegen einer zu hohen (z. B. Hysol 3430) oder zu niedrigen (z. B. Vitralit 6127) Viskosität, welche sich nachteilig für den großflächigen Klebstoffauftrag erwies, abgewählt.

Tabelle 4: Klebstoffauswahl

Klebstoff	Chemische Basis	Farbe	Aus- härtung [s]	Wellenlänge [nm]	Viskosität [mPas]
Delo PB 437	Urethanacrylat (radikalische Ver- netzung)	farblos klar	6	320-420	8000
Delo PB 4442	Acrylat (radikalische Ver- netzung)	farblos klar	60	320-450	650
Delo VE 57639	Acrylat (radikalische Ver- netzung)	gelblich	15	~430	45000
Delo VE 57758	Urethanacrylat (radikalische Ver- netzung)	gelblich	15	~430	n.a.
Vitralit 6127 (Panacol Elasol)	Urethanacrylat (radikalische Ver- netzung)	transparent	15	n.a.	20-100
Hysol 3430 (2K) (Henkel Loctite)	Epoxidharz (Polyadditionsver- netzung)	transparent	720	---	20000-30000
Photowell 1012 (Wellmann)	Methacrylat / Acrylat (radikalische Ver- netzung)	transparent klar	30	320-420	600-900

Schwindungsspannungen resultieren aus den unterschiedlichsten Ursachen, wie z. B. aus den Klebstoffeigenschaften und der Fügeteilverformungen beim Vernetzungsprozess. Abbildung 20 zeigt das Eigenspannungsverhältnis eines Acrylsystems gegenüber eines 2K-Epoxid Harz für geklebte Glas-Kunststoff-Hybridelemente. Acrylsysteme zeigen für Hybridklebungen ein günstigeres Spannungsverhalten. Bei Epoxiden können die Eigenspannungswerte u. U. zum Bruch des Klebverbundes führen.

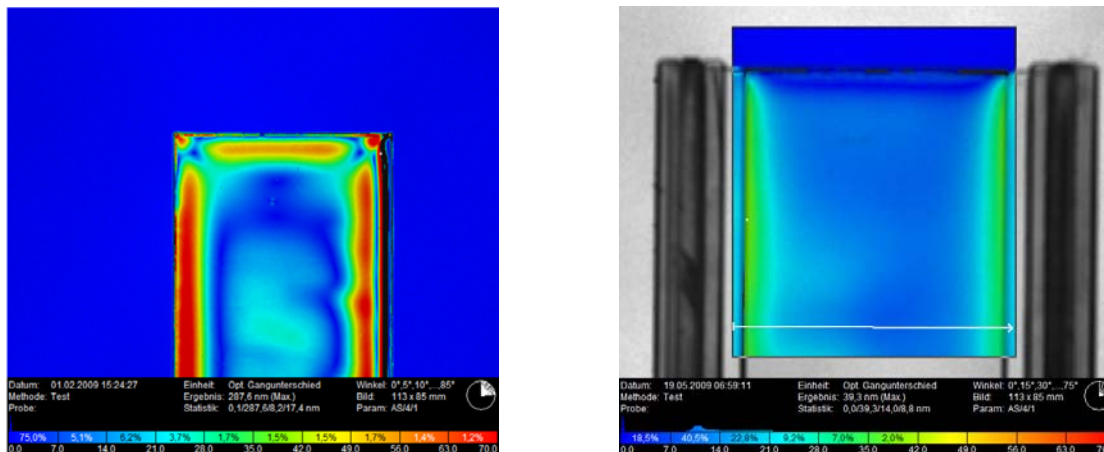


Abbildung 20: Spannungsoptische Analyse von Glasverbunden mit 2K-Epoxid Harz (links) und mit einem 1K-Acrylatklebstoff (rechts)

Klebstofftechnologien

Die Aushärtung wird bei UV vernetzenden Acrylaten in besonderem Maße durch die Strahlungsintensität bestimmt. Für die Entwicklung von Konzepten zur Herstellung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen im Laborbereich und später im Werks- bzw. Baustellenbereich sind Kenntnisse zu den Transmissionseigenschaften der verwendeten Materialien essentiell. Abbildung 21 zeigt auszugsweise die Transmissionsspektren für Floatglas und PMMA 45 bzw. 65 im UV-Bereich. Die Durchlässigkeit für UV-Strahlung wird bei den gezeigten Kunststoffen bereits stark eingeschränkt. Dies hat Auswirkungen auf die Aushärtung, welche durch die höhere Transparenz vorzugsweise immer durch die Glasseite erfolgen sollte. Für die Fertigung ist entscheidend, dass Sandwich-Verbunde mit einer Kunststoffzwischenlage nicht durch einseitige Bestrahlung aushärten werden können.

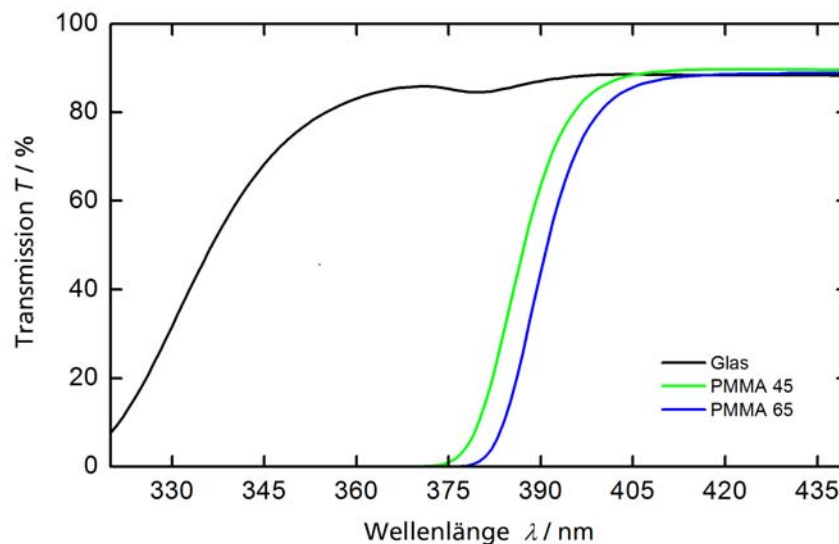


Abbildung 21: Transmissionsspektren

Oberflächencharakterisierung

In Tabelle 2 sind die Oberflächenenergien sowie die dispersen bzw. polaren Anteile der untersuchten Kunststoff- und Glasoberflächen dargestellt. Eine Vorbehandlung mit Pyrosil hebt

die Oberflächenenergie von Kunststoffoberflächen durch Steigerung des polaren Anteils signifikant an. Bei Floatglas führt die Reinigung nicht zur Steigerung der Oberflächenenergie.

Tabelle 5: Oberflächenenergien von Glas und Kunststoff

	Oberflächen- energie [mN/m]	Dispersiver Anteil [mN/m]	Polarer Anteil [mN/m]
PMMA Resist 45			
ohne Vorbehandlung	39,94	35,44	4,5
Pyrosil	69,76	38,64	31,12
PMMA Resist 65			
ohne Vorbehandlung	40,14	33,56	6,58
Pyrosil	69,67	38,32	31,35
Trogamid® CX7323			
ohne Vorbehandlung	45,26	28,92	16,34
Pyrosil	68,08	32,47	35,61
Makrolon® UV			
ohne Vorbehandlung	41,63	40,31	1,32
Pyrosil	68,25	37,10	31,15
Floatglas (Badseite)			
ohne Vorbehandlung	53,7	29,6	24,1
Reinigung mit Ethanol/Hexan	46,8	29,7	17,1
Floatglas (Atmosphäre)			
ohne Vorbehandlung	67,9	30,5	37,4
Reinigung mit Ethanol/Hexan	54,6	29,1	25,5

Mit FTIR lassen sich die Transmissionsspektren vor und nach der Vorbehandlung analysieren, um durch Änderung der Banden chemische Veränderungen an der Oberfläche zu detektieren. Abbildung 22 zeigt beispielhaft die Messung an Makrolon® UV mit und ohne Plasmavorbehandlung. Durch die Plasmavorbehandlung ändert sich die detektierte Carbonylbandenintensität bei etwa $\lambda = 1750 \text{ cm}^{-1}$. Dies ist ein Indiz für die Verringerung der Carbonyloberflächenkonzentration und kann zu einer Verschlechterung der polaren Wechselwirkung zwischen Kunststoff und Klebstoff führen.

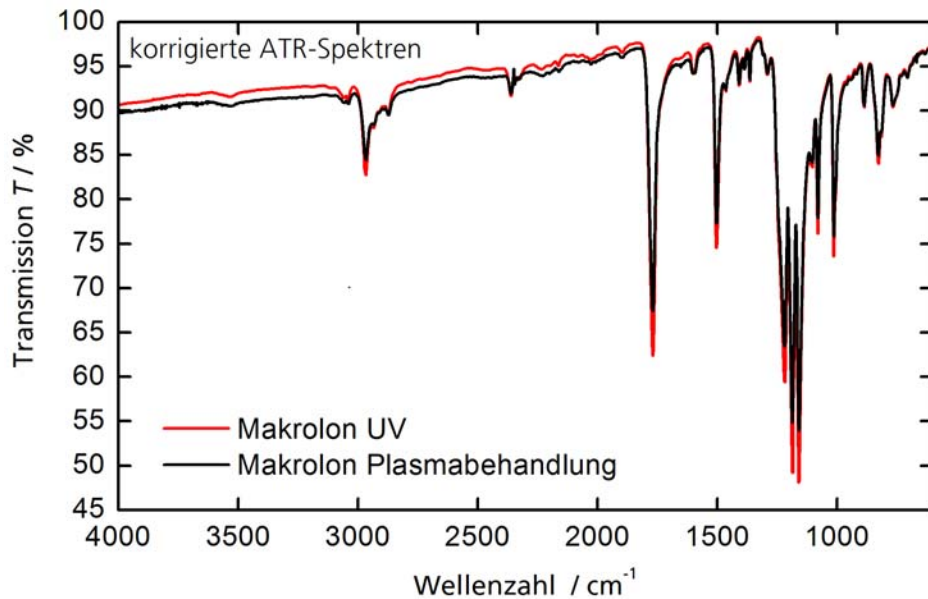


Abbildung 22: FTIR-Spektren Makrolon® UV

Prüfkörperversuche

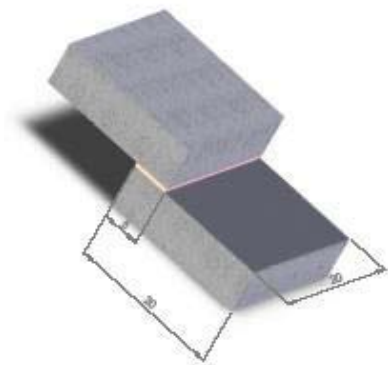
Mit dem Druckscherversuch wurden die Scherfestigkeiten der geklebten Prüfkörper ermittelt. Die angewendete Werksnorm der Firma DELO beruht auf der Prüfung von reinen bzw. gemischten Klebverbindungen aus Glas und Kunststoff. Die kleinteiligen Druckscherprüfkörper wurden in die Prüfvorrichtung eingelegt und parallel zur Scherbeanspruchung fixiert (Abbildung 23). Über die Führungshülse wurde die Kraft axial an der Stirnseite des Prüfkörpers eingeleitet.



Aufbau



Führungshülse (Detail)



Prüfkörper

Abbildung 23: Druckscherprüfung

Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen an einseitig überlappten Druckscherkörpern zeigten, dass die Plasmavorbereitung nur in wenigen Fällen zu einer Verbesserung der Klebfestigkeit und Alterungsbeständigkeit führt. Bessere Ergebnisse werden mit dem Pyrosil-Verfahren erzielt, welches teilweise zu deutlichen Erhöhungen der Festigkeiten führte. Die Ergebnisse bestätigten somit die vorab durchgeführten Messungen der Oberflächenenergie (Tabelle 5). Die folgenden Abbildungen zeigen stellvertretend für die durchgeführten Untersuchungen die Ergebnisse für die Klebstoffe DELO PB 437 und PB 4442 im ungealterten Zustand und nach einer Freibewitterung von 6 Monaten. Unabhängig von der gewählten

Vorbehandlung fallen die ermittelten Druckscherfestigkeiten nach der Freibewitterung stark ab. Im gesamten Untersuchungsfeld zeigte kein Klebstoff eine gute Alterungsbeständigkeit gegenüber kombinierten Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen bei unversiegelten Kanten. Ein Kantenschutz ist für die langzeitbeständige Klebung daher dringend erforderlich.

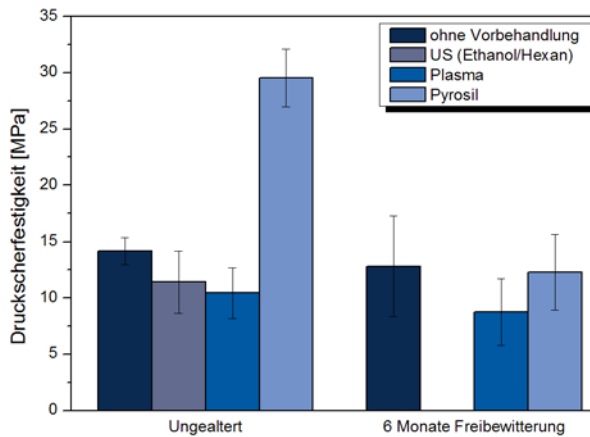


Abbildung 24: Makrolon® UV / DELO PB 437

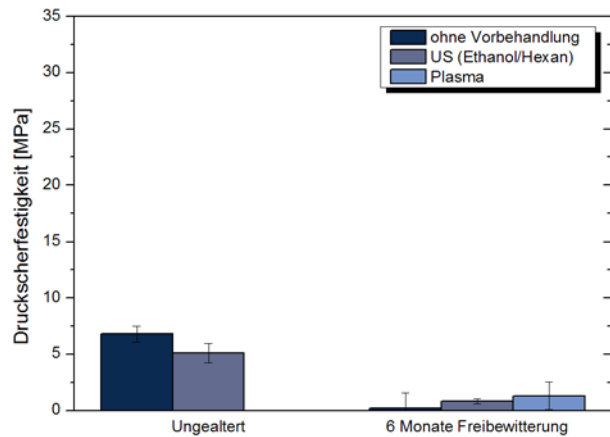


Abbildung 25: Makrolon® UV / DELO PB 4442

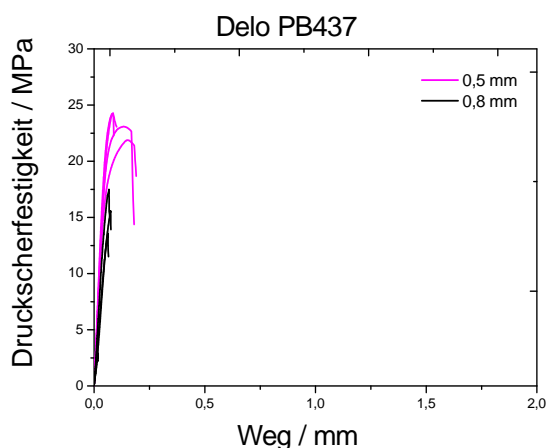


Abbildung 26: Verformungsverhalten DELO PB437

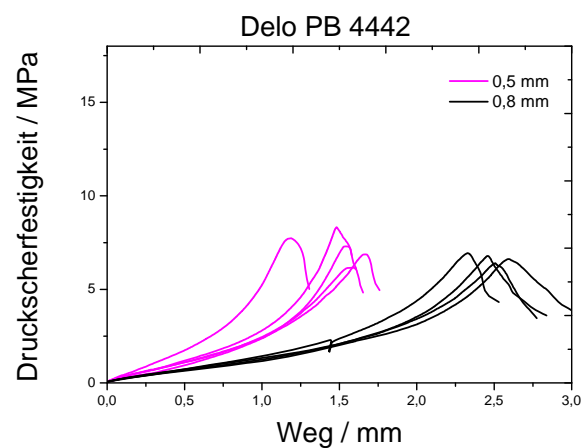


Abbildung 27: Verformungsverhalten DELO PB 4442

In den Abbildungen 26 und 27 ist das Verformungsverhalten für die Klebstoffe DELO PB 437 und DELO PB 4442 abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Klebstoff PB437 im ausgehärteten Zustand nur geringe Verformungen zulässt. Im Gegensatz dazu zeigt der PB 4442 ein deutlich höheres elastisches Verhalten. Für großflächige Hybridklebungen aus Glas und Kunststoff hat das Elastizitätsverhalten der Klebstoffe eine entscheidende Bedeutung. Nur durch die Elastizität des Klebstoffs können temperaturabhängige Längenänderungen der Verbundpartner kompensiert werden, um einen Bruch oder Verzug des gesamten Bauteils zu verhindern. Obwohl der DELO PB 4442 nur geringe Druckscherfestigkeiten aufweist, ist dieser für großflächige Klebungen besser geeignet als der starre PB 437.

In Abbildung 28 sind zusammenfassend für die drei Klebstoffe der engeren Auswahl die ermittelten Druckscherfestigkeiten nach unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden und Alterungsverfahren bzw. ungealtert dargestellt.

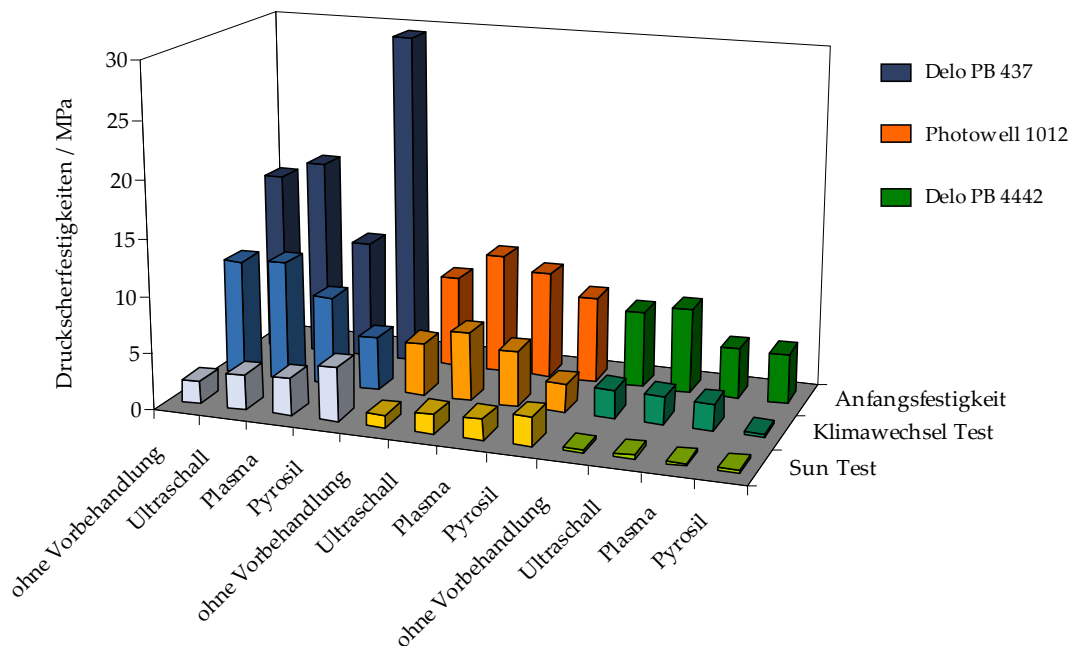


Abbildung 28: Überblick der erzielten Druckscherfestigkeiten für die Klebstoffe der engeren Auswahl

3.3.3.2 Untersuchungen am Verbundwerkstoff

Herstellung Verbundscheiben

Bei der Herstellung großflächiger Verbundscheiben erfolgte der Klebstoffauftrag durch Gießen des Klebstoffs auf die Kunststoffzwischenlage und anschließend Aufsetzen des ersten Glaselements. Anschließend wird der Verbund unter UV-Licht ausgehärtet. Die Verfahrensfolge wurde für die Klebung des zweiten Glaselements wiederholt. Die Klebstoffdicke wurde durch die Menge abzüglich der zu erwartenden Schrumpfung bestimmt. Für Großteilversuche wurde zum Ausgleich der Toleranzen und Spannungen eine Klebstoffdicke von etwa $d^{\circ} = 1^{\circ} \text{ mm}$ angestrebt.



Abbildung 29: Klebstoffauftrag (links) und Klebung (rechts)

Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Häufigstes Versagenskriterium bei der Prüfung der geklebten Verbundscheiben nach DIN EN ISO 9142 - Zyklus D3 war die Delamination des Klebstoffverbundes (Abbildung 30 rechts). Die Kombination aus Feuchtigkeits- und Temperaturbelastung führt zur wiederholten Ausdehnung und Schrumpfung der geklebten Kunststoffplatten, wodurch sich die Spannungen im Klebstoff verstärken. In die dadurch hervorgerufenen Delaminationen im Randbereich kann Wasser eindringen und die weitere Schädigung der Bauteile beschleunigen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kompensation der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Kunststoff nur in wenigen Fällen durch den eingesetzten Klebstoff zu bewerkstelligen ist.

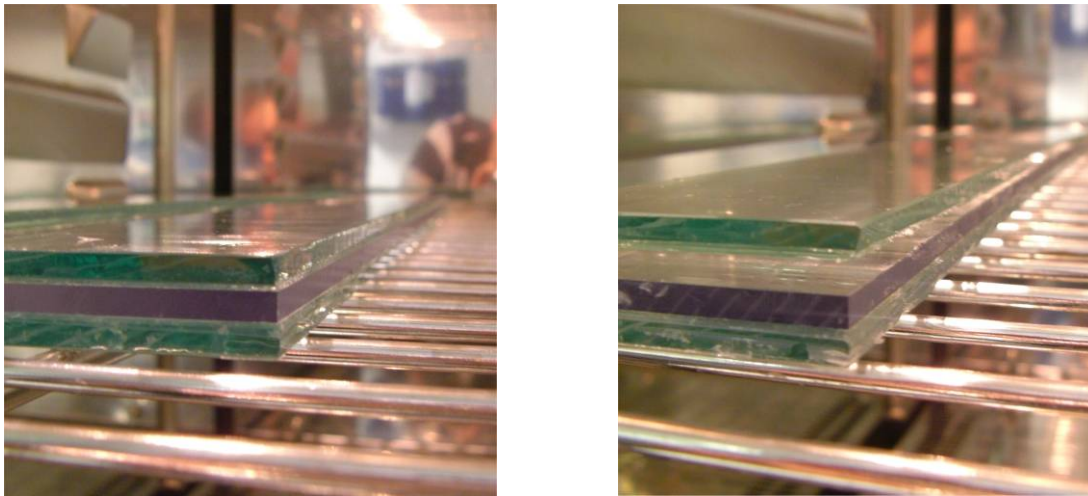


Abbildung 30: ungeschädigtes (links) und delaminiertes (rechts) Glas-Kunststoff-Hybridelement

Untersuchungen Kunststoff-Kantenschutz

SiO_x -Schichten wurden in einem CVD-Prozess aus SiH_4 und O_2 während einer Gleichspannungs-Bogenentladung auf der Oberfläche abgeschieden (Abbildung 31). Der eingesetzte Breitstrahl-Plasmagenerator LARGE (Linear extended Arc) ist eine typische Linienquelle und wurde für flächige Abscheidungen auf Blechen entwickelt. Für den hier durchgeführten Kantenschutz war die Anordnung ungeeignet. Es musste aufgrund der Bauteilgeometrie in offener Reaktionskammer gearbeitet werden, wodurch der Wirkungsgrad des Prozesses stark absank. Auch waren die Prozesstemperaturen noch zu hoch und führten vor allem bei mehrmaliger Überfahrt zu Delaminationen des Klebverbundes. In weiteren Arbeiten sollen hier kältere Atmosphärenplasmen, wie Openair®- oder durch Mikrowelle erzeugte Plasmen eingesetzt werden.

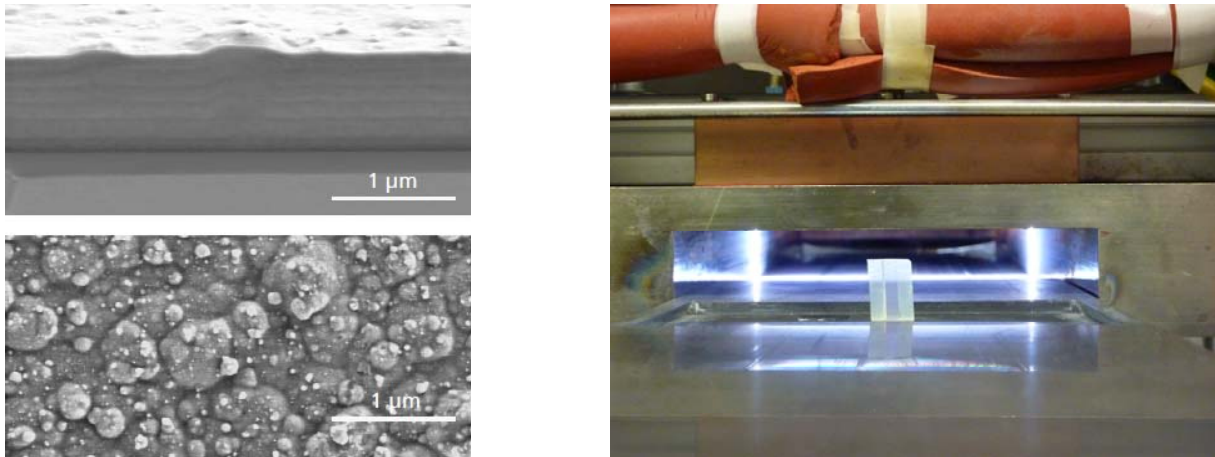


Abbildung 31: SiO_x-Beschichtung (links) und CVD-Beschichtungsanlage (rechts)

3.3.4 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.

Beim Schwerpunkt Kunststoffuntersuchungen wurden nach der Recherche und der Beschaffung verschiedener Materialien folgende Materialprüfungen durchgeführt:

- mechanische Untersuchungen: Zugversuche (DIN EN ISO 527), Druckversuche (DIN EN ISO 604), Biegeversuch (DIN EN ISO 178), Schlagbiegeversuche nach Charpy – gekerbt und ungekerbt (DIN EN ISO 179); bei ausgewählten Materialien wurden diese Prüfungen zusätzlich bei $T = +80\text{ °C}$ und $T = -20\text{ °C}$ durchgeführt
- dynamisch-mechanische Untersuchungen (Torsionsschwingversuch, DIN EN ISO 6721-2) in einem Temperaturbereich von $T = -50\text{ °C}$ bis zu $T = +180\text{ °C}$
- Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeformbeständigkeit: Heat Distortion Temperature (HDT) nach DIN EN ISO 75, Verfahren B, Aufheizrate: $v_T = 120\text{ K/h}$
- Untersuchung des Kriechverhaltens: Zeitstandzugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 899-1 mit einer Last von $\sigma = 45\text{ N/mm}^2$ bei $T = 23\text{ °C}/50\%\text{ rel. Luftfeuchte}$

Des Weiteren liefen entsprechend Arbeitsplan umfangreiche Arbeiten zu Kunststoff-Kunststoff-Verbindungen (Abbildung 32).

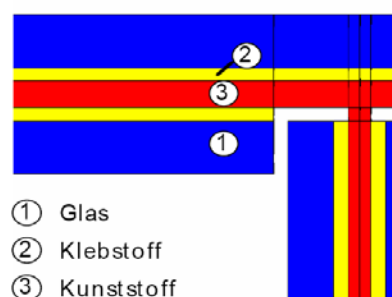


Abbildung 32: Beispiel für eine geklebte Verbindung Kunststoff-Kunststoff

Die dabei verwendeten Klebstoffe sind lösungsmittelhaltig und basieren auf dem Anlösen des Kunststoffs. Dadurch erzielt man Klebfugen mit hohen Festigkeiten, allerdings mit dem Risiko durch das Lösungsmittel auch Spannungsrisse zu injizieren. Man einigte sich daher innerhalb der Forschungsgruppe darauf, auch in diesen Fällen die bei der Verklebung von Glas-Kunststoff eingesetzten Klebstoffe zu verwenden.

Aufgrund der mechanischen Bearbeitung der Kunststoffkanten entstehen raue Oberflächen, welche sowohl den optischen Eindruck als auch die Festigkeit mindern. Aus diesem Grund und um die „Schwachstelle“, das heißt die Klebfuge, vor dem Eindringen von Wasser und anderen Medien zu schützen und damit die Langlebigkeit zu erhöhen, wurden abschließend Möglichkeiten zur Oberflächenversiegelung der Kanten betrachtet. Die dazu im TITK durchgeführten Arbeiten lagen schwerpunktmäßig auf der Untersuchung verschiedener transparenter Lacke. Kriterien waren hier eine gute Haftung auf Glas und Kunststoff, eine geringe Vergilbungsneigung, Langzeitstabilität sowie ausreichende Elastizität.

Dazu wurden verschiedene Lacke - UV-härtend, lufthärtend, ein- bzw. zweikomponentig - getestet. Der Auftrag der Lacke mittels Walze stellte ein geringeres Problem dar als ein Auftrag mittels Sprühaggregat. Im Anschluss wurden die Proben hinsichtlich ihrer erreichten Oberflächengüte, wie Rauigkeit, und Haftung mittels eines modifizierten Kratztests untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Mehrzahl der Lacke nicht für beide Substrate - Glas und Kunststoffe wie PC - brauchbar sind. Als geeignet erwiesen sich die beiden Produkte:

- 2-K-Acryllack für Alu und Glas - Lankwitzer Lackfabrik,
- Protector II Plus - Argon International.

Mit diesen beiden Materialien wurden die Kanten von Hybridscheiben - Glas-Kunststoff-Glas; mit verschiedenen Klebstoffen - beschichtet und anschließend sowohl einer Klimalagerung als auch einer Wasserlagerung unterzogen. Tatsächlich verhindern beide Materialien das Eindringen von Wasser bei einer reinen Wasserlagerung. Allerdings kann es wegen der großen Unterschiede der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kunststoffen und Glas bei heftigen und schnellen Klimawechseln zu Rissen in der Beschichtung kommen.

3.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Aufgrund der Belastungsart beim Biegeträger spielt die Kantenfestigkeit für die Tragfähigkeit des Gesamtsystems eine entscheidende Rolle. Da die Versuche zeigten, dass deutlich mehr Faktoren auf die Festigkeit der Glaskante Einfluss haben, als bisher angenommen, scheint eine umfassendere Analyse der Kantenfestigkeit eine sinnvolle Bereicherung. Diese Fragestellung betrifft den Konstruktiven Glasbau im Allgemeinen.

Weiterhin besteht Optimierungspotential bei der Klebung für große Flächen zwischen Materialien mit unterschiedlicher Temperatúrausdehnung. Neben der Optimierung des Ausgleichs unterschiedlicher Temperatúrausdehnungen sollte auch die Klebtechnologie weitergehend untersucht werden, so dass ein wirtschaftliches Kleben unter Minimierung von Schrumpfscheinungen beim Aushärteprozess erreicht wird.

3.5 Interdisziplinäre Weiterentwicklung

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte sich die Professur Stahlbau, Bauhaus-Universität Weimar, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik, Technische Universität Dresden, intensiv mit der Klebtechnik und Oberflächenbehandlung beschäftigen. Dies führte zu neuen Projektideen und ersten Projektkon-

zepten für Anwendung bei Hybridelementen, die für das Bauwesen interessant werden können.

Aus Sicht des TITK sind verschiedene Aspekte des Themas auch für die Fachdisziplin „Polymerverarbeitung“ interessant (siehe Abschnitt 2.2.). Aus diesem Grund ist ein entsprechender Beitrag in der Zeitschrift KUNSTSTOFFE vorgesehen.

3.6 Verwertungspotenzial

Im konstruktiven Glasbau ist der Einsatz derartiger Glasträger gut denkbar, da die im Bauwesen gestellten Sicherheitsanforderungen in erhöhtem Maße berücksichtigt werden können. Hybride Glasträger mit erhöhter Resttragfähigkeit könnten momentan verwendete VSG-Träger ersetzen. Notwendig ist dazu jedoch eine wirtschaftliche und ökologische Analyse, um die Einsetzbarkeit derartiger Glasträger abschätzen zu können.

3.7 Beteiligte Wissenschaftler

Bauhaus-Universität Weimar – IKI	TU Dresden – IBK
<p>Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner Dr.-Ing. Jörg Hildebrand Dipl.-Ing. Katrin Zimmerer Dipl.-Ing. Björn Wittor Herr Holger Dabbert</p> <ul style="list-style-type: none"> - beratende Tätigkeit - Recherche zur Beanspruchungsanalyse von tragenden Glaselementen - Erprobung der großflächigen Klebungen - Herstellung der geklebten Doppel-T-Träger - Herstellung von Rahmenverbindungen - Durchführung von Klimatests nach DIN EN ISO 9142, DIN EN 1279-3, DIN EN ISO 12543-4 - Durchführung von spannungsoptischen Untersuchungen von Proben nach dem Klebeprozess und während der Beanspruchung - Vierpunkt-Biegeversuche an 940 mm langen DoppelHybridträgern aus Floatglas und Polycarbonat mit Trägerhöhe $h = 100$ mm und Lasteinleitungsbereich $s = 190$ mm - Langzeitversuche an 940 mm langen Hybridträgern aus Floatglas und Polycarbonat mit Trägerhöhe $h = 100$ mm und Lasteinleitungsbereich $s = 190$ mm - Belastungsversuche von Verbindungsvarianten für Rahmenecken – geklebt und mit Formteil - Numerische Untersuchungen zum Kurz- und Langzeitverhalten von Doppel-T-Träger - Numerische Untersuchungen zum Kurzzeittragverhalten von Verbindungsvarianten für Rahmenecken - Numerische Modellierung der Rissbildung und Rissausbreitung im Glas eines Hybridträgers 	<p>Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Dr.-Ing. Silke Tasche Dipl.-Ing. Kristina Härth Dipl.-Ing. Martin Tasche</p> <ul style="list-style-type: none"> - beratende Tätigkeit - Recherche über Anwendungsbereiche von strukturellen Glaselementen - Untersuchungen zur Kantenfestigkeit - Erprobung der großflächigen Klebungen - Durchführung von Klimatests nach DIN EN ISO 9142, DIN EN 1279-3, DIN EN ISO 12543-4 - Vierpunkt-Biegeversuche an VSG-Trägern - Vierpunkt-Biegeversuche an Hybridträgern aus Floatglas mit Variation der Polycarbonatdicke (2, 3, 4 mm) sowie Trägerhöhe ($h = 150$ mm, $h = 100$ mm) und Lasteinleitungsbereich (200 mm, 333 mm) - Vierpunkt-Biegeversuche an Hybridträgern aus ESG mit Variation oben genannter Parameter - Vierpunkt-Biegeversuche an Hybridträgern aus TVG mit Variation oben genannter Parameter - Vierpunkt-Biegeversuche an Polycarbonatplatten unterschiedlicher Dicke und Höhe - Langzeitversuche an Hybridträgern aus Floatglas mit Variation der Polycarbonatdicke (2, 3, 4 mm) sowie Trägerhöhe ($h = 150$ mm, $h = 100$ mm) und Lasteinleitungsbereich (200 mm, 333 mm)

TU Dresden – IOF	TITK
<p>Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer Dr. rer. nat Irene Jansen Dipl.-Chem. Michael Müller Dipl.-Ing. Rico Rechner</p> <ul style="list-style-type: none"> - beratende Tätigkeit - Klebstoffrecherche - Auswahl der Klebtechnologien - Oberflächencharakterisierung - Prüfkörperversuche - Untersuchungen zum Kantenschutz - Alterungsuntersuchungen 	<p>Dr.-Ing. Ralf-Uwe Bauer Dr.-Ing. Thomas Reußmann Dr. Nechwatal Dipl.-Ing. Katrin Müller Dipl.-Ing. Marina Weiß-Quasdorf Anett Kammel</p> <ul style="list-style-type: none"> - beratende Tätigkeit - Konzeption und Koordination der Prüfungen von transparenten Kunststoffen sowie der Verarbeitungsversuche - Durchführung von Versuchen - Prüfungen der Kunststoffe - Untersuchungen zum Kantenschutz

4. Publikationen

4.1 Publikationen in Fachzeitschriften

- [Müller 2010-1] Müller, K., Jansen, I., Nechwatal, A., Müller, M., Hauspurg, Ch.: Transparente, tragende Baukonstruktionen aus Glas und Kunststoff. Eingereicht bei „Kunststoffe“, erscheint voraussichtlich in der Juli/August-Ausgabe.
- [Weller 2009-1] Weller, B., Härth, K., Werner, F., Hildebrand, J.: Hybridbauteile im Konstruktiven Glasbau. In: Stahlbau 78 (2009) S1, S. 29-35.

4.2 Kongressbeiträge

- [Göbel 2007-1] Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.: Glass-plastic-hybrid construction. In: GLASS PER-FORMANCE DAYS 2007, 15-18. June 2007, Tampere, Finland S. 355-358.
- [Göbel 2009-1] Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.: Glas-Kunststoff-Hybridelemente – Einsatz und Werkstoffeigenschaften. In: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 01. - 03. April 2009, Bayreuth, S. 578- 584.
- [Hildebrand 2007-1] Hildebrand, J., Werner, F.: Eigenschaft und Anwendung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen. In: VDI-Wissensforum, 19.-20.03.2007, Leonberg, VDI-Berichte 1970 - Bauen mit innovativen Werkstoffen, S. 69-80.
- [Hildebrand 2008-1] Hildebrand, J., Werner, F.: Innovative Konstruktionen aus Glas und Einsatz der Klebtechnik. In: 6. Praxisseminar - Kleben Thema: „Konstruktives Kleben – Gegenwart und Zukunftsvisionen“, 12. Februar 2008, Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH Jena.
- [Hildebrand 2008-2] Hildebrand, J., Werner, F.: Neue Wege im Konstruktiven Glasbau - Glas-Kunststoff-Hybridelemente. In: 7. Symposium Zukunft Glas von der Tradition zum High-Tech-Produkt, 04. – 05. Juni 2008, Zwiesel, S. 15-26.
- [Hildebrand 2008-3] Hildebrand, J., Werner, F., Zimmerer, K.: Load-Bearing Glass-Plastic Hybrid Elements. In: International Symposium on the Application of Architectural Glass (ISAAG 2008), 27. – 28. Oktober 2008, München.
- [Hildebrand 2009-1] Hildebrand, J., Werner, F., Rechner, R., Müller, M., Jansen, I.: Experimentelle Untersuchungen zu Klebstoffen für Glas-Kunststoff-Hybridelemente. In: 17. ibausil, 23. - 26. September 2009, Weimar.
- [Hildebrand 2009-2] Hildebrand, J., Werner, F.: Hybridkonstruktionen – Transparente Träger aus Glas-Kunststoff. In: VDI-Wissensforum, 03. - 04. November 2009, Köln, VDI-Berichte 2084 - Bauen mit innovativen Werkstoffen, S. 103-115.
- [Hildebrand 2010-1] Hildebrand, J., Werner, F., Müller, K., Nechwatal, A.: Hybridkonstruktionen – Transparente Tragelemente aus Glas-Kunststoff. In: Tagungsband, Thüringer Werkstofftag 2010, 24. März 2010, Ilmenau.

- [Weller 2009] Weller, B.; Weimar, T.; Härth, K.: Hybrid Components of Glass and Polycarbonate. In: Tagungsband; Glass Performance Days 2009; Tampere 2009. Seite 144-148.
- [Weller 2010-1] Weller, B.; Härth, K.: Experimental Research on Glass-Polycarbonate Beams. In: Tagungsband; Challenging Glass 2010; Conference on Architectural and Structural Applications of Glass; Delft 2010. Beitrag angenommen.
- [Weller 2010-2] Weller, B.; Nicklisch, F.: Bonding of Glass – Latest Trends and Research. In: Tagungsband; NASCC – The Steel Conference; Orlando 2010. Beitrag angenommen.
- [Weller 2010-3] Weller, B.; Härth, K.: Hybrid structural elements made of glass and polycarbonate. In: Tagungsband; International Conference on Structure and Architecture 2010; Guimaraes 2010. Beitrag angenommen.
- [Scheiber 2010] Scheiber, F., Oppel, M., Hildebrand, J.: Numerische Simulation eines Glas-Kunststoffträgers. 17. DAST - Kolloquium Stahlbau, 5.-6. Oktober 2010, Weimar, 2010. Beitrag angenommen.

4.3 Buchbeiträge

Keine

4.4 Studien- und Diplomarbeiten, Dissertationen, Habilitationen, Berichte, sonstige Publikationen

- [Conrad 2008] Conrad, M.: Aufstellung eines ereignis-diskreten Simulationsmodells zur Produktion von Glas-Kunststoff- Hybridelementen. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2009.
- [Jung 2009] Jung, B.: Spannungsoptische Untersuchungen im Glasbau. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2009.
- [Reichert 2010] Reichert, I.: Parameteranalyse eines Doppel-T-Träger aus Glas-Kunststoff. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2010.
- [Rütz 2009] Rütz, J.: Experimentelle Untersuchungen zum Aushärteprozess und zur Festigkeit geklebter Verbindungen aus Glas und Kunststoff. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2009.
- [Salbach 2009] Salbach, St.: Untersuchungen zur Bemessung von Klebstoffschichten bei statisch beanspruchten Bauteilen. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2009.
- [Scheiber 2010a] Scheiber, F., Oppel, M.: Numerische Analyse der Rissentstehung bei Glas-Kunststoff-Hybridträgern. Schriftliche Arbeit im Entwurfsseminar, Bauhaus-Universität Weimar, 2010.
- [Schneider 2009] Schneider, R.: Untersuchung von Glas-Kunststoff-Hybridtragwerken mit zeitabhängigen Materialmodellen. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2009.